

С использованием результатов других солнечных нейтринных экспериментов и теории нейтринных осцилляций с большим углом смешивания (LMA) в SAGE впервые получены значения потока ν -нейтрино, имеющих при достижении ими Земли электронный аромат, $(3,40 \pm 0,46) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и полного потока ν -нейтрино $(6,0 \pm 0,8) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Галлиевые солнечные нейтринные эксперименты впервые показали, что подавляющее большинство солнечных нейтрино, приходящих на Землю, — это низкоэнергетичные нейтрино, рождённые в протон-протонной реакции, и дали прямое доказательство правильности Стандартной солнечной модели и LMA-решения для солнечных нейтринных осцилляций.

Для выяснения причин неожиданно низкой скорости захвата нейтрино на Ga в экспериментах с искусственными источниками нами разработана концепция нового эксперимента с источником нейтрино высокой интенсивности и оптимизированной геометрией Ga-мишени [34].

Эксперимент SAGE до сих пор остаётся единственным экспериментом, в котором измеряется поток ν -нейтрино. Мы планируем продолжать мониторинг потока солнечных нейтрино и вести подготовку к новому эксперименту с высокоинтенсивным нейтринным источником и оптимизированной геометрией Ga-мишени.

Благодарности. Считаю своим приятным долгом выразить благодарность от SAGE M. Baldo-Ceolin, G.T. Garvey, W. Haxton, H. Ejiri, R. G. H. Robertson, А.Ю. Смирнову, А. Suzuki и нашим коллегам из коллабораций GALLEX и GNO за постоянный интерес, проявляемый ими к нашей работе, и плодотворные и стимулирующие дискуссии. Мы особенно благодарны В.А. Матвееву и В.А. Рубакову за активную поддержку в течение всего времени проведения эксперимента и внимание ко многим важным аспектам наших исследований. Мы также признательны Российскому фонду фундаментальных исследований за многолетнюю поддержку нашего эксперимента.

Список литературы

1. Allen J S *The Neutrino* (Princeton, N.J.: Princeton, Univ. Press, 1958)
2. Bahcall J N *Neutrino Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989) [Бакал Дж *Нейтринная астрофизика* (М.: Мир, 1993)]
3. Марков М А *Нейтрино* (М.: Наука, 1964)
4. Davis R (Jr.), Harmer D S, Hoffman K C *Phys. Rev. Lett.* **20** 1205 (1968)
5. Pontecorvo V, Report PD-205 (Chalk River: National Research Council of Canada, Division of Atomic Energy, 1946)
6. Понтекорво Б М *ЖЭТФ* **53** 1717 (1967) [Pontecorvo В М *Sov. Phys. JETP* **26** 984 (1968)]
7. Кузьмин В А *ЖЭТФ* **49** 1532 (1965) [Kuz'min V A *Sov. Phys. JETP* **22** 1051 (1966)]
8. Барабанов И Р и др. *Письма в ЖЭТФ* **32** 384 (1980) [Barabanov I R et al. *JETP Lett.* **32** 359 (1980)]
9. Гаврин В Н, Захаров Ю И, Препринт П-560 (М.: ИЯИ АН СССР, 1987)
10. Захаров Ю И, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ИЯИ АН СССР, 1987)
11. Гаврин В Н и др., Препринт П-698 (М.: ИЯИ АН СССР, 1991)
12. Глотов В И, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ИЯИ АН СССР, 1979)
13. Панченко В П и др. *Вопросы атомной науки и техники* **21** (3(21)) (1989)
14. Peña-Garay C, Serenelli A M, arXiv:0811.2424

15. Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* **60** 055801 (1999); astro-ph/9907113
16. Danshin S, Kopylov A, Yants V *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **349** 466 (1994)
17. Cleveland B T *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **214** 451 (1983)
18. Hampel W, Rensberg L P *Phys. Rev. C* **31** 666 (1985)
19. Абдурашитов Д Н и др. (SAGE Collab.) *ЖЭТФ* **122** 211 (2002) [Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *JETP* **95** 181 (2002)]
20. Abdurashitov J N (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* **80** 015807 (2009); arXiv:0901.2200
21. Kaether F et al. *Phys. Lett. B* **685** 47 (2010); arXiv:1001.2731
22. Arpesella C et al. (Borexino Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 091302 (2008)
23. Aharmim B et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 111301 (2008)
24. Cleveland B T et al. *Astrophys. J.* **496** 505 (1998)
25. Abazov A I et al. *Phys. Rev. Lett.* **67** 3332 (1991)
26. Anselmann P et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **285** 376 (1992)
27. Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* **59** 2246 (1999)
28. Abdurashitov J N et al. *Phys. Rev. C* **73** 045805 (2006)
29. Hampel W et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **420** 114 (1998)
30. Hampel W et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **436** 158 (1998)
31. Haxton W C *Phys. Lett. B* **431** 110 (1998)
32. Giunti C, Laveder M *Phys. Rev. D* **82** 053005 (2010); arXiv:1005.4599
33. Bahcall J N *Phys. Rev. C* **56** 3391 (1997); hep-ph/9710491
34. Gavrin V N et al., arXiv:1006.2103

PACS numbers: 29.40.Ka, 95.55.Vj
DOI: 10.3367/UFN.0181.201109h.0984

Байкальский нейтринный эксперимент

Г.В. Домогацкий

1. Введение

Байкальский нейтринный эксперимент уходит своими корнями в 1959–1960 гг., когда М.А. Марков [1] высказал идею постановки крупномасштабных подземных и глубоководных экспериментов для изучения свойств нейтрино и природных источников их происхождения. Идея оказалась чрезвычайно плодотворной. Проведение исследований при резко сниженном уровне фона проникающего космического излучения в условиях, когда огромные объёмы окружающего грунта или воды сами служат мишенями для нейтрино высоких энергий, позволило достичь принципиально нового уровня чувствительности экспериментов, сделало доступным для изучения редкие процессы, поиск которых в наземных лабораториях практически невозможен. Подземное направление развивалось быстро, и оно уже имеет в своём активе такие выдающиеся результаты, как регистрация всплеска нейтринного излучения, сопутствовавшего взрыву сверхновой 1987а в Большом Магеллановом Облаке; установление ограничения на время жизни протона; проведение исследования нейтринного излучения Солнца и обнаружение эффекта нейтринных осцилляций; уверенное выделение первых событий от нейтрино, образующихся при распаде радиоактивных элементов уранового и ториевого ряда в недрах Земли.

Развитие глубоководного направления началось примерно на 15 лет позднее и набирало темпы достаточно

Г.В. Домогацкий. Институт ядерных исследований РАН,
Москва, РФ
E-mail: domogats@pcba10.inr.ruhep.ru

Таблица. Черенковские детекторы нейтрино высоких энергий в естественных средах: в воде и антарктическом льду. Значения эффективных масс детекторов приведены для событий с энергией 100 ТэВ

Детектор*	Оптические модули	Эффективная масса, Мт	Глубина, м	Годы создания	Состояние
"Байкал"	230	10	1100–1300	1993–1998	Действующий
AMANDA	677	15	1350–1850	1994–2000	Закрыт (2009 г.)
ANTARES	900	10	2050–2400	2002–2008	Действующий
IceCube	900	10	1350–2250	2005–2011	Действующий
КМ3NeT (NEMO)	≈ 10000	≈ 1000	2300–3300	≈ 2017	В стадии разработки
КМ3NeT (NESTOR)	≈ 10000	≈ 1000	2000–4000		
КМ3NeT (ANTARES)	≈ 10000	≈ 1000	1400–2400		
"Байкал-НТ-1000"	≈ 2500	600–800	800–1300	≈ 2018	В стадии разработки

* AMANDA — Antarctic Muon And Neutrino Detector Array, ANTARES — Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch, КМ3NeT — КМ3 Neutrino Telescope, NEMO — NEutrino Mediterranean Observatory, NESTOR — Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research.

медленно вследствие необычности тех инженерных проблем, которые возникали при решении задачи стационарного размещения регистрирующей аппаратуры на больших глубинах в естественных водоёмах или во льду и при создании устойчивых систем управления данными и передачи данных. История становления этого направления вплоть до нынешнего дня отражена в приведённой таблице.

В этой таблице, в которой дан перечень созданных, действующих и проектируемых крупномасштабных нейтринных телескопов, отсутствует широко известный в своё время проект DUMAND (Deep Underwater Muon and Neutrino Detection). Этот проект создания в Тихом океане, вблизи Гавайских островов, глубоководного черенковского детектора нейтрино высоких энергий с эффективным объёмом порядка 1 км^3 или более являлся в 1970-е–1980-е годы предметом активных обсуждений физиков США, СССР, Японии и ФРГ. По инициативе выдающихся американских физиков Ф. Райнеса и Дж. Лёрнида мировое сообщество приступило к обсуждению конкретных путей реализации идеи М.А. Маркова. Изучались технические возможности размещения в океане на глубине около 5 км регистрирующей аппаратуры, способной давать надёжную информацию об энергии и направлении движения нейтрино или, точнее, заряженных частиц, рождающихся при взаимодействии нейтрино с веществом мишени (т.е. океанской воды). Были разработаны и созданы первые образцы глубоководных регистрирующих модулей на основе фотоэлектронных умножителей с большой площадью фотокатода, проведены испытания при погружении с корабля гирлянд таких модулей как базового элемента будущего детектора, но попытки установить гирлянду на дно с целью её эксплуатации в стационарном режиме успехом не увенчались. С возникшими проблемами, лежавшими в области глубоководной инженерии, авторы справиться уже не успели — кредит доверия финансирующих организаций оказался исчерпанным, и работа над проектом в связи с этим прекратилась в середине 1990-х годов.

Непосредственное участие советских физиков и океанологов в работе по проекту закончилось намного раньше, около 1980-го года, что было связано с извест-

ными афганскими событиями. По предложению А.Е. Чудакова, поддержанному М.А. Марковым, в СССР с 1980 г. началась разработка метода глубоководной регистрации, ориентирующаяся на озеро Байкал как на полигон для испытаний и место развёртывания прототипов будущих крупномасштабных детекторов. В период с 1993 г. по 1998 г. на Байкале был развёрнут первый глубоководный детектор НТ-200, выделены первые события от нейтрино (1994 г.). К 2005 г. за счёт установки внешних гирлянд глубоководных регистрирующих модулей эффективный объём детектора был увеличен до 10^7 м^3 . К настоящему времени разработан научно-технический проект и завершается программа испытаний базовых элементов детектора с эффективным объёмом масштаба 1 км^3 НТ-1000 (Baikal-GVD (Gigaton Volume Detector)) [2]. Результаты исследований на детекторах НТ-200 и НТ-200+, а также рассказ об основных элементах проекта будущего детектора НТ-1000 составляют основное содержание настоящего доклада.

Завершая рассказ о работах по проекту DUMAND — первому и достаточно авантюренному штурму проблемы "в лоб", необходимо подчеркнуть, что этот опыт оказался далеко не бесплодным. С одной стороны, он чётко обозначил трудности развёртывания стационарных систем в природных водоёмах, с другой стороны, при этом были решены многие проблемы создания глубоководной регистрирующей аппаратуры, получили развитие теоретические исследования проблем нейтринной астрофизики высоких энергий. Всё это инициировало формирование исследовательских групп NESTOR, ANTARES и NEMO, ставивших своей целью разработку проектов и создание в Средиземном море крупномасштабных детекторов с эффективным объёмом порядка 1 км^3 [3], а в качестве промежуточного этапа — создание детекторов объёмом около 10^7 м^3 . Дальше всех удалось продвинуться коллаборации ANTARES, которая в 2008 г. завершила развёртывание первого такого детектора в Тулонском заливе вблизи берегов Франции [4] (см. таблицу).

Идея создания крупномасштабных детекторов путём размещения регистрирующей аппаратуры непосредственно в прозрачной естественной среде, будучи изначально чисто "глубоководной" идеей, получила в начале

1990-х годов новую линию развития, когда возникла остроумная мысль (Дж. Лёрнид, Ф. Хальзен) о размещении аппаратуры в глубинных слоях антарктического льда. Оптические свойства льда на глубинах свыше 1,5 км оказались вполне пригодными для решения этой задачи, и на протяжении 1990-х годов на американской станции Амундсен–Скотт на Южном полюсе был развёрнут детектор AMANDA [5]. Регистрирующая аппаратура вмораживалась в специально протаиваемые во льду скважины. Успешное развитие проекта позволило убедить Конгресс США выделить средства (около 300 млн долларов) на создание нейтринного телескопа следующего поколения IceCube [6] с эффективным объёмом, близким к 1 км^3 . Разработка проекта, изготовление и монтаж аппаратуры детектора заняли примерно 10 лет, и в конце декабря 2010 г. он был смонтирован в предусмотренном проекте варианте. На последние числа апреля 2011 г. намечена торжественная "инаугурация" проекта.

Это короткое вступление написано с целью показать тот фон, на котором развивался и продолжает развиваться Байкальский нейтринный проект, рассказ о котором является основной целью настоящего сообщения.

2. Байкальские нейтринные телескопы НТ-200 и НТ-200 +

Датой начала Байкальского нейтринного эксперимента можно считать 1 октября 1980 г., когда в Институте ядерных исследований АН СССР (ИЯИ) было принято решение о создании лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий, ставшей впоследствии ядром Байкальской коллаборации, в состав которой вошли Иркутский государственный университет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Объединённый институт ядерных исследований (Дубна), исследовательский центр DESY-Zeuthen (Германия), Нижегородский государственный технический университет, Санкт-Петербургский государственный морской университет. На некоторых этапах эксперимента деятельное участие в нём принимали сотрудники Томского политехнического университета, Российского научного центра "Курчатовский институт", Лимнологического института СО РАН, Акустического института им. академика Н.Н. Андреева и ряда других российских и зарубежных (Венгрия, Италия, Франция) институтов.

Выбор Байкала как места для развёртывания экспериментальных исследований был обусловлен совершенно очевидными соображениями ввиду следующего: хорошая (сравнимая с океанской) прозрачность глубинных вод; наличие мест с достаточно крутым береговым склоном, в которых глубина порядка 1 км, необходимая для защиты от проникающего космического излучения, находится на расстоянии 4–5 км от берега; наличие ледового покрова, позволяющего в течение двух месяцев вести с него монтаж глубоководной аппаратуры и прокладку кабельных коммуникаций; низкий ожидавшийся уровень собственного свечения глубинных вод, обусловленного биоломинесценцией и радиоактивностью. На основе опыта и результатов многолетних исследований Байкала сотрудниками Лимнологического института СО РАН было определено конкретное место развёртывания работ — акватория озера, примыкающая к 106-му км Кругобайкальской железной дороги.

Разработке проекта, монтажу и запуску детектора предшествовали длительные, на протяжении около десяти лет, исследования гидрооптических, гидрофизических и гидрологических условий проведения экспериментов на Байкале. При этом был открыт эффект собственного свечения глубинных вод озера, обусловленный окислением частиц размером порядка нескольких микрометров, который характерен для доминирующих по численности байкальских бактерий и многих видов фито- и зоопланктона. Совместно с Опытно-конструкторским бюро "Экран" (г. Новосибирск) специально для Байкальского нейтринного телескопа был разработан высокочувствительный гибридный фотоприёмник "Квazar-370" с диаметром фотокатода 370 мм [7]. Была осуществлена постанова на длительную эксплуатацию пилотных глубоководных черенковских детекторов, на которых не только отработывалась методика, но и выполнялись первые физические эксперименты.

Следующей задачей Байкальской коллаборации стало создание первого крупномасштабного глубоководного нейтринного телескопа НТ-200 [8] с эффективной площадью регистрации $(2-10) \times 10^3 \text{ м}^2$ (в зависимости от энергии частицы) и проведение на нём широкой программы физических исследований. Монтаж и развёртывание этой установки проводились с 1993 г. по 1998 г.

2.1. Нейтринный телескоп НТ-200

Телескоп НТ-200, расположенный на глубине около 1100 м, на расстоянии 3,6 км от берега, связан с береговым центром управления и сбора данных донными линиями связи. Телескоп представляет собой трёхмерную решётку из оптических модулей (ОМ), размещённых на вертикальных грузонесущих кабель-тросах, нижние концы которых прикреплены к донным якорям, а верхние — к буйам. Каждый вертикальный кабель-трос с оптическими модулями формирует структурную единицу телескопа — гирлянду ОМ. Телескоп содержит 192 ОМ, размещённых на восьми гирляндах длиной 68 м каждая. Вокруг центральной гирлянды равномерно по окружности радиусом 21,5 м расположены периферийные гирлянды (рис. 1).

Оптический модуль содержит гибридный фотоприёмник "Квazar-370", размещённый в корпусе из низкорadioактивного стекла. С целью подавления темнового темпа счёта фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и фонового свечения глубинных вод озера оптические модули объединены в пары и включены по схеме совпадения регистрируемых сигналов во временном окне порядка 15 нс. Две пары ОМ, имеющие общий электронный системный модуль (СМ), образуют функциональную единицу гирлянды — "связку". В состав СМ входят два блока выработки локального сигнала, блок преобразования амплитуды, запуска светодиодов и блок управления. На выходе СМ формируются выходные сигналы (локальные триггеры) двух каналов "связки", длительность которых пропорциональна входным зарядам, а передний фронт определяет время срабатывания канала.

Локальные триггеры со всех системных модулей гирлянды поступают в блоки электроники гирлянды (БЭГ). В состав БЭГ входят шесть измерительных каналов, контроллер и модемы каналов данных и управления. Каждая гирлянда имеет два БЭГ, соединённых с блоком электроники детектора (БЭД). В БЭГ информация каждого измерительного канала оцифровывается,

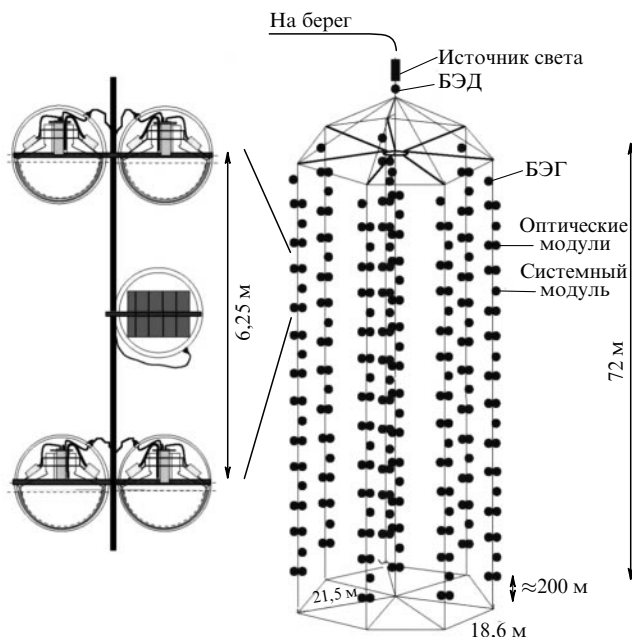


Рис. 1. (а) Структурный элемент телескопа NT-200 ("связка"), состоящий из двух пар оптических модулей, подключённых на совпадение, и электронный модуль, обеспечивающий их функционирование. (б) Схема телескопа NT-200.

вырабатывается локальный триггер и формируется сигнал запроса в БЭД. Если в БЭД накоплено достаточное количество сигналов запроса с блоков электроники гирлянд в интервале 500 нс, то формируется сигнал "подтверждение", поступающий во все БЭГ. После этого в блоках электроники гирлянд событию присваивается номер и накопленные данные передаются в береговой центр сбора данных и управления.

2.2. Телескоп NT-200 +

С целью повышения эффективности регистрации нейтрино высоких энергий в 2004–2005 гг. телескоп NT-200 был модернизирован. Новая установка, которая получила название NT-200 + [9], обеспечила как увеличение эффективного объёма для регистрации каскадов от нейтрино, так и существенное повышение энергетического разрешения телескопа в целом. Детектор NT-200 + является начальной версией структурной единицы будущего Байкальского нейтринного телескопа с эффективным объёмом порядка 1 км^3 .

Телескоп состоит из центральной части (NT-200) и трёх внешних гирлянд, расположенных на расстоянии 100 м от центральной части детектора (рис. 2). На каждой внешней гирлянде размещается по 12 ОМ, сгруппированных попарно, аналогично ОМ телескопа NT-200. Расстояния между каналами внешних гирлянд составляют 20, 50, 20, 30 и 20 м, считая от верха канала.

В то время как оптические модули, системные модули и измерительные каналы каждой внешней гирлянды полностью идентичны аппаратуре NT-200, электроника контроллера БЭГ потребовала существенной модернизации. Каждый измерительный канал БЭГ содержит преобразователь время – код, преобразователь длительность – код и схему записи номера события. Сигнал "запрос гирлянды" формируется контроллером БЭГ при условии двойных совпадений сигналов "запрос канала" во временных воротах 0,5 мкс. Запросы от всех

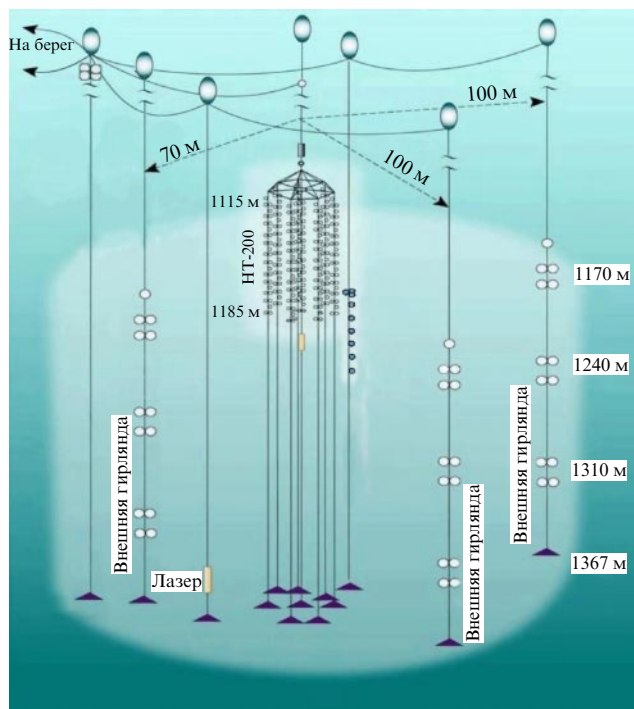


Рис. 2. Детектор NT-200 +.

внешних гирлянд передаются в центральный коммутационный модуль установки (центр DAQ (Data Acquisition)), где формируется сигнал "подтверждение", который возвращается ко всем внешним гирляндам. При наличии сигнала "подтверждение" информация о каждом локальном триггере (время, амплитуда, номер события, номер измерительного канала и глобальный номер события) передаётся через контроллер БЭГ в DAQ-центр. DAQ-центр обеспечивает объединение потоков данных и трансляцию всей полученной информации в береговой центр.

2.3. Основные результаты, полученные в экспериментах на нейтринном телескопе NT-200

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп является одним из трёх крупнейших (наряду с IceCube на Южном полюсе и подводным детектором ANTARES в Средиземном море) детекторов нейтрино высоких энергий. К существенным результатам первого этапа (1980–1998 гг.) работ по Байкальскому проекту следует отнести результаты анализа данных, полученных на промежуточных установках, который проводился с целью как изучения параметров детекторов, так и исследования потока атмосферных мюонов, выделения событий от нейтрино, поиска магнитных монополей. Был установлен верхний предел интенсивности потока сверхтяжёлых магнитных монополей по эффекту катализа распада барионов, находившийся на уровне наиболее сильных из существовавших тогда теоретических и экспериментальных ограничений. В экспериментах на детекторах NT-36 и NT-96 были зарегистрированы первые нейтринные события и установлены одно из наиболее сильных на то время ограничений на поток мюонов, обусловленный эффектом аннигиляции массивных частиц тёмной материи (нейтралино) в центре Земли [10], а также ограничение на интенсивность природного потока нейтрино сверхвысоких (более 10 ТэВ) энергий [11]. Наиболее

значимые результаты получены в 2005–2008 гг., когда на основе анализа экспериментальных данных Байкальского телескопа были установлены новые (одни из наиболее сильных на сегодня) ограничения на величину природного потока быстрых ($v/c > 0,8$) магнитных монополей — $4,6 \times 10^{-17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ (при $v/c = 1$) [12], на потоки мюонов, сопровождающих процесс аннигиляции массивных частиц тёмной материи (нейтралино), в центре Земли — $4,2 \times 10^{-15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [13] и в центре Солнца — $3 \times 10^3 \text{ км}^{-2} \text{ год}^{-1}$ в области масс нейтралино более 500 ГэВ [14], на поток нейтрино от гамма-всплесков в интервале энергий вплоть до 10^7 ГэВ [15], на поток нейтрино от локальных галактических источников, расположенных на южной небесной полусфере, в зависимости от склонения, — $E^2 F < 5 \times 10^{-10} \text{ ГэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и, наконец, ограничение на интенсивность природного диффузного потока нейтрино, которое в диапазоне энергий от 2×10^4 ГэВ до 2×10^7 ГэВ для величины суммарного потока нейтрино всех типов составляет $E^2 F < 2,9 \times 10^{-7} \text{ ГэВ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ и находится в области теоретически предсказываемых значений [16]. Получено также наиболее сильное на сегодня ограничение на поток электронных антинейтрино в области резонанса с энергией $6,3 \times 10^6$ ГэВ, которое составляет $F < 3,3 \times 10^{-20} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1} \text{ ГэВ}^{-1}$ [17]. Реализация проекта создания детектора НТ-200+ позволила примерно в три раза повысить чувствительность эксперимента по поиску природного диффузного потока нейтрино и начать исследование их энергетического спектра при энергиях вплоть до значения 10^{18} эВ.

Удачное сочетание природных факторов наряду с хорошей изученностью места проведения работ и накопленный опыт развёртывания и эксплуатации нейтринного телескопа первого поколения НТ-200/НТ-200+ создали необходимые предпосылки для начала работ по проектированию и созданию глубоководного нейтринного телескопа с эффективным объёмом масштаба 1 км^3 НТ-1000 на Байкале.

3. Нейтринный телескоп НТ-1000 (Baikal-GVD)

Успешная эксплуатация на протяжении более чем десяти лет нейтринных телескопов НТ-200/НТ-200+ и AMANDA и результаты, полученные в этих экспериментах, явились мотивацией разработки и создания телескопов следующего поколения с характерным масштабом порядка 1 км^3 : IceCube, НТ-1000 и KM3NeT. Байкальский телескоп НТ-1000 и средиземноморский KM3NeT, расположенные в северном полушарии, и IceCube, находящийся на Южном полюсе, благодаря их различному географическому положению будут взаимно дополнять друг друга и сформируют мировую сеть установок, нацеленных на поиск и исследование источников нейтрино на всей небесной сфере. Детекторы, расположенные в северном полушарии, обладают важным преимуществом — они способны вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики и галактической плоскости, в которых сконцентрирована значительная доля потенциальных источников космических лучей высоких энергий.

Глубоководный нейтринный телескоп НТ-1000 [2] предназначен для решения широкого круга задач астрофизики, космологии и физики элементарных частиц: поиска локальных нейтринных источников, исследова-

ния диффузного потока нейтрино, поиска проявлений тёмной материи, поиска магнитных монополей и других гипотетических частиц. Глубоководный телескоп следующего поколения НТ-1000 на Байкале будет являться экспериментальным комплексом, нацеленным на исследование природных потоков нейтрино в области энергий, больших 10 ТэВ, посредством регистрации черенковского излучения вторичных мюонов и ливней, генерируемых в нейтринных взаимодействиях.

Концепция НТ-1000 основывается на ряде достаточно очевидных требований, предъявляемых к конструкции и организации регистрирующей системы нового детектора: максимально возможном использовании преимуществ монтажа регистрирующей системы с ледового покрова Байкала; возможности наращиваемости установки и обеспечения её эффективной эксплуатации уже на первых стадиях развёртывания; возможности реализации различных вариантов компоновки и плотности фотодетекторов в рамках одной измерительной системы.

С учётом перечисленных выше требований, а также на основе оценок светосилы и разрешающей способности НТ-1000, полученных в результате полномасштабного моделирования отклика телескопа на черенковское излучение мюонов и ливней, была разработана архитектура измерительных и коммуникационных систем и выбрана базовая конфигурация телескопа (рис. 3). Регистрирующими элементами НТ-1000 являются 2304 ФЭУ "Hamamatsu-7081HQE" с полусферическим фотокатодом диаметром 250 мм. ФЭУ вместе с управляющей электроникой размещаются в глубоководных стеклянных корпусах, образуя оптические модули. Оптические модули, устанавливаемые на вертикальных кабель-тросах, формируют гирлянды ОМ.

Основной структурной единицей гирлянды является секция оптических модулей. Секция представляет собой функционально законченный узел детектора, включающий в себя системы регистрации излучения, обработки сигналов, калибровки, формирования триггера и передачи данных. Секция содержит 12 ОМ, расположенных с шагом в 15 м вдоль гирлянды, центральный модуль (ЦМ) и служебный модуль (СМ). Аналоговые сигналы со всех ОМ секции передаются в ЦМ по коаксиальным кабелям. По этим же кабелям к оптическим модулям подводится низковольтное питание. В ЦМ осуществляются преобразование аналоговых сигналов оптических модулей в цифровой код и передача информации по линии Ethernet. Служебный модуль предназначен для калибровки временных каналов установки, определения положения гирлянды и электропитания ОМ. Местоположение гирлянды определяется гидроакустической системой измерения координат (ГАСИК). Каналы синхронизации, электропитания и передачи данных секций объединяются в коммутационном модуле (КМ) гирлянды, который связан с центральным блоком управления кластера.

Базовая конфигурация каждого из 12 кластеров НТ-1000 включает в себя восемь гирлянд по 24 ОМ каждая (две секции на гирлянде), находящихся на расстоянии 60 м друг от друга. Расстояние между соседними кластерами составляет 300 м. Кластеры гирлянд связаны с береговым центром комбинированными электрооптическими кабелями длиной около 6 км. Каждый кластер НТ-1000 является функционально законченным детектором (с чувствительным объёмом масштаба НТ-200+ или ANTARES), способным работать как в составе единой

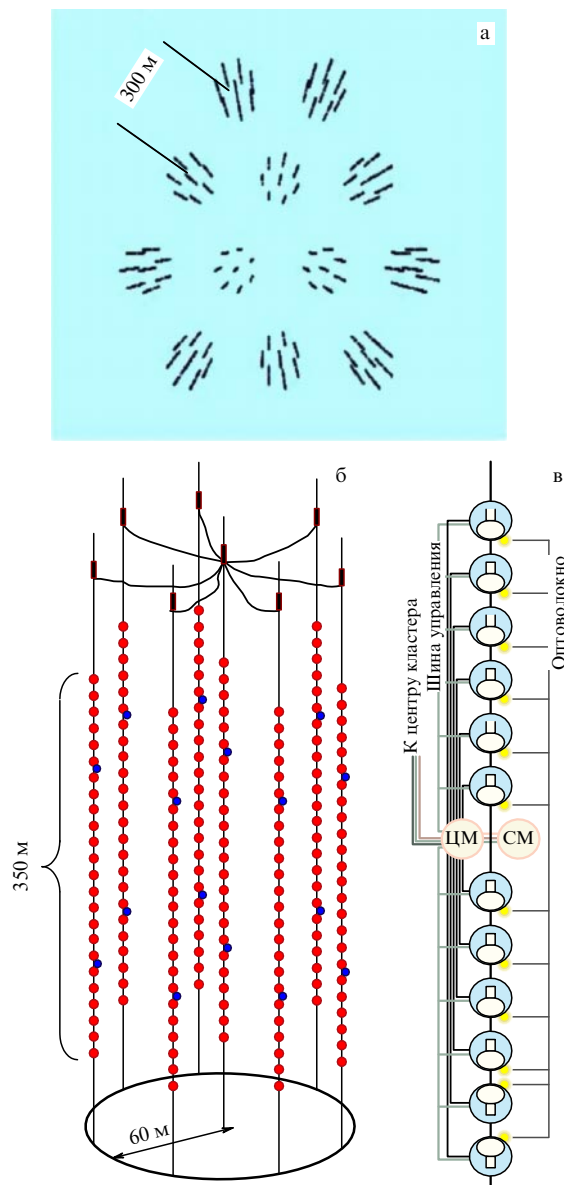


Рис. 3. Схематичное изображение нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба NT-1000 на озере Байкал: (а) вид сверху; (б) кластер телескопа; (в) гирлянда ОМ.

установки, так и автономно. Это обеспечивает простоту наращивания телескопа и возможность ввода в эксплуатацию его отдельных частей по мере развёртывания NT-1000.

Базовая конфигурация телескопа обеспечивает эффективный объём для регистрации ливней порядка $0,2 - 0,7 \text{ km}^3$ в интервале энергий $10^5 - 10^9 \text{ ГэВ}$ и эффективную площадь для регистрации мюонов около $0,2 - 0,5 \text{ km}^2$ в диапазоне энергий $10^4 - 10^6 \text{ ГэВ}$. Точность восстановления направлений мюонов составляет $0,4^\circ - 0,6^\circ$, а направлений ливней — $5^\circ - 7^\circ$. Относительная точность восстановления энергии ливня $20 - 35\%$.

Долговременные натурные испытания аппаратуры секции NT-1000 были успешно проведены на Байкале в период с 2008 г. по 2010 г. В настоящее время создан и испытан в лабораторных условиях прототип кластера NT-1000, который будет развёрнут в Байкале в период зимней экспедиции 2011 г. в режиме постоянного набора данных.

4. Заключение

Итак, метод глубоководной регистрации элементарных частиц (и его ледовая модификация) доказал свою эффективность в исследовании природных потоков нейтрино высоких энергий. Современный уровень знаний о диффузном потоке нейтрино в диапазоне энергий $10^{13} - 10^{18} \text{ эВ}$, локальных источниках нейтрино с энергией выше 10 ГэВ , природном потоке быстрых магнитных монополей и о проявлениях массивных частиц тёмной материи определяется главным образом результатами экспериментальных исследований на Байкальском нейтринном телескопе NT-200/NT-200+, на детекторе AMANDA на Южном полюсе и (в последние, 2009-й и 2010-й, годы) на детекторе ANTARES в Средиземном море. Ввод в строй детектора IceCube на Южном полюсе позволит в ряде задач повысить чувствительность экспериментальных исследований ещё на один-два порядка величины.

На повестке дня стоит задача создания в Северном полушарии детектора(-ов) способного(-ных) вести изучение центра нашей Галактики на уровне чувствительности, соизмеримой с таковой детектора IceCube. Значительно ближе всех к созданию рабочего проекта такого детектора стоит сейчас Байкальская коллаборация, которая разработала, создала и подготовила к натурным испытаниям в 2011–2012 гг. прототип базового элемента — автономного кластера глубоководных гирлянд регистрирующих модулей детектора кубокилометрового масштаба NT-1000 (Baikal-GVD).

Автор считает своим долгом выразить признательность коллеге Ж.-А.М. Джилкибаеву, оказавшему существенную помощь в подготовке этой публикации.

Список литературы

1. Markov M A, in *Proc. of the 1960 Annu. Intern. Conf. on High-Energy Physics, Rochester, New York, 25 August – 1 September 1960* (Eds J Prentki, J Steinberger) (Rochester, N.Y.: Univ. of Rochester, 1960) p. 572
2. Baikal Collab. "Научно-технический проект глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба на оз. Байкал", <http://baikalweb.jinr.ru/GVD/> (2010)
3. Katz U F (for the KM3NeT Consortium) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **602** 40 (2009)
4. Circella M (for the ANTARES Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **602** 1 (2009)
5. Andres E et al. *Astropart. Phys.* **13** 1 (2000)
6. Abbasi R et al. (and the IceCube Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **601** 294 (2009)
7. Bagdjev R I et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **420** 138 (1999)
8. Baikal Collab. "The Baikal Neutrino Telescope NT-200", Preprint No. 92-03 (Moscow: INR RAS, 1992)
9. Аврорин А В и др., Препринт № 1265/2010 (М.: ИЯИ РАН, 2010)
10. Балканов В А и др. *ЯФ* **62** 1015 (1999) [Balkanov V A et al. *Phys. At. Nucl.* **62** 949 (1999)]
11. Balkanov V A et al. *Astropart. Phys.* **14** 61 (2000)
12. Aynutdinov V et al. *Astropart. Phys.* **29** 366 (2008)
13. Antipin K et al. *Proc. of the First Workshop on Exotic Physics with Neutrino Telescopes: EPNT06, Uppsala, Sweden, September 20 – 22, 2006* (Ed. C P de los Heros) (Uppsala: Uppsala Univ., 2007)
14. Avrorin A et al. *Proc. of the 31st ICRC, Lodz, Poland, July 2009*; arXiv:0909.5589
15. Аврорин А В и др., Препринт № 1211/2009 (М.: ИЯИ РАН, 2009)
16. Аврорин А В и др. *Письма в Астрон. журн.* **35** 723 (2009) [Avrorin A V et al. *Astron. Lett.* **35** 651 (2009)]
17. Aynutdinov V *Astropart. Phys.* **25** 140 (2006)