

УДК 537.591

## БАЙКАЛЬСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП КАК ГЛУБОКОВОДНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

<sup>1</sup>В.М. Айнутдинов, <sup>1</sup>В.А. Балканов, <sup>4</sup>И.А. Белолептиков, <sup>2</sup>Д.Ю. Богородский, <sup>2</sup>Н.М. Буднев, <sup>5</sup>Р. Вишневецкий, <sup>1</sup>И.А. Данильченко, <sup>1</sup>Г.В. Домогацкий, <sup>1</sup>А.А. Дорошенко, <sup>2</sup>А.П. Дьячок, <sup>1</sup>Ж.-А.М. Джилкибаев, <sup>1</sup>О.Н. Гапоненко, <sup>1</sup>К.В. Голубков, <sup>2</sup>О.А. Гресс, <sup>2</sup>Т.И. Гресс, <sup>2</sup>О.И. Гришин, <sup>1</sup>В.А. Жуков, <sup>9</sup>Н.В. Ильин, <sup>1</sup>А.М. Клабуков, <sup>8</sup>А.И. Климов, <sup>2</sup>А.А. Кочанов, <sup>4</sup>К.В. Конищев, <sup>1</sup>А.П. Кошечкин, <sup>3</sup>Л.А. Кузьмичев, <sup>6</sup>В.Ф. Кулепов, <sup>1</sup>С.П. Михеев, <sup>5</sup>Т. Миколайский, <sup>5</sup>Е. Миддел, <sup>1</sup>М.Б. Миленин, <sup>2</sup>Р.Р. Миргазов, <sup>9</sup>И.И. Орлов, <sup>3</sup>Э.А. Осипова, <sup>2</sup>Г.Л. Паньков, <sup>2</sup>Л.В. Паньков, <sup>1</sup>А.И. Панфилов, <sup>1</sup>Д.П. Петухов, <sup>4</sup>Е.Н. Плисковский, <sup>1</sup>П.Г. Похил, <sup>1</sup>В.А. Полещук, <sup>3</sup>Е.Г. Попова, <sup>3</sup>В.В. Просин, <sup>7</sup>М.И. Розанов, <sup>2</sup>В.Ю. Рубцов, <sup>2</sup>Ю.А. Семеней, <sup>2</sup>Б.А. Таращанский, <sup>6</sup>С.В. Фиалковский, <sup>4</sup>Б.К. Шайбонов, <sup>3</sup>А.В. Широков, <sup>5</sup>К. Шпиринг

## BAIKAL NEUTRINO TELESCOPE AS UNDERWATER LABORATORY FOR MULTIDISCIPLINARY STUDIES

<sup>1</sup>V. Ainutdinov, <sup>1</sup>V. Balkanov, <sup>4</sup>I. Belolaptikov, <sup>2</sup>D. Bogorodsky, <sup>2</sup>N. Budnev, <sup>1</sup>I. Danilchenko, <sup>1</sup>G. Domogatsky, <sup>1</sup>A. Doroshenko, <sup>2</sup>A. Dyachok, <sup>1</sup>Zh. Dzhilkibaev, <sup>6</sup>S. Fialkovsky, <sup>1</sup>O. Gaponenko, <sup>4</sup>K. Golubkov, <sup>2</sup>O. Gress, <sup>2</sup>T. Gress, <sup>2</sup>O. Grishin, <sup>9</sup>N. Il'in, <sup>1</sup>A. Klabukov, <sup>8</sup>A. Klimov, <sup>2</sup>A. Kochanov, <sup>4</sup>K. Konischev, <sup>1</sup>A. Koshechkin, <sup>6</sup>V. Kulepov, <sup>3</sup>L. Kuzmichev, <sup>5</sup>E. Middell, <sup>1</sup>S. Mikheyev, <sup>6</sup>M. Milenin, <sup>2</sup>R. Mirgazov, <sup>9</sup>I. Orlov, <sup>3</sup>E. Osipova, <sup>2</sup>G. Pan'kov, <sup>2</sup>L. Pan'kov, <sup>1</sup>A. Panfilov, <sup>1</sup>D. Petukhov, <sup>4</sup>E. Pliskovsky, <sup>1</sup>P. Pokhil, <sup>1</sup>V. Poleshuk, <sup>3</sup>E. Popova, <sup>3</sup>V. Prosin, <sup>7</sup>M. Rosanov, <sup>2</sup>V. Rubtzov, <sup>4</sup>B. Shaibonov, <sup>1</sup>A. Sheifler, <sup>3</sup>A. Shirokov, <sup>5</sup>Ch. Spiering, <sup>2</sup>B. Tarashansky, <sup>5</sup>R. Wischnewski, <sup>1</sup>V. Zhukov

В лекции представлен текущий статус и перспективы Байкальского нейтринного проекта. Приводится обзор основных физических результатов, полученных с помощью нейтринных телескопов НТ200 и НТ200+. Также рассмотрены некоторые результаты междисциплинарных исследований динамических процессов в оз. Байкал.

The present-day status and prospect of Baikal Neutrino Project is presented. We review the selected physical results obtained with Baikal neutrino telescopes. Some results of interdisciplinary studies of dynamic processes in Lake Baikal are presented as well.

### Введение

К настоящему времени с помощью оптических, радио и рентгеновских телескопов получен огромный объем знаний по истории развития и устройству Вселенной. С другой стороны, многие объекты во Вселенной не прозрачны для электромагнитного излучения, например, мы не можем ничего узнать о термоядерных реакциях внутри Солнца с помощью обычных методов наблюдения. Во Вселенной существуют несравнимо более мощные, чем наше Солнце, источники энергии, такие как квазары, активные галактические ядра, пульсары и т. д. Что происходит внутри них? Одна из самых интригующих загадок современной астрофизики – происхождение космических лучей гигантских энергий, вплоть до  $10^{20}$  эВ. Каковы их источники и механизмы ускорения? Еще более серьезна проблема так называемой «темной материи». В последние годы новым «окном» во Вселенную, с помощью которого, возможно, удастся получить какие-то ответы на эти и другие вопросы, становится нейтринная астрономия. Многие астрофизические объекты от обычных звезд типа нашего Солнца до активных галактических ядер являются мощными источниками нейтрино самых разных энергий. Нейтрино, родившиеся в реакциях термоядерного синтеза в центральных областях Солнца, практически беспрепятственно выходят за его пределы и достигают Земли. В последние десятилетия создан ряд установок [1–4] для изучения энергетического спектра солнечных нейтрино с характерной энергией 0.1–10 МэВ. В результате этих исследова-

ний экспериментально проверена модель термоядерного синтеза на Солнце, впервые зарегистрирован нейтринный сигнал от взрыва сверхновой [5] и, что не менее важно, открыты осцилляции нейтрино – взаимное превращение нейтрино разных типов [6]. Наличие осцилляций однозначно указывает на то, что масса нейтрино, хоть и очень мала, но не равна нулю.

Подземные установки для регистрации нейтрино сложны и велики по размерам (объем «Superkamiokande» [7] – самой крупной из них –  $52000 \text{ м}^3$ ). Тем не менее, эти установки далеки от того, чтобы с их помощью можно было регистрировать нейтрино высоких и сверхвысоких энергий от сверхмощных галактических и внегалактических источников, вести поиск новых форм материи, решать другие фундаментальные задачи астрофизики и физики элементарных частиц. Характерный размер детекторов, необходимых для этого составляет  $1 \text{ км}^3$  и более. Трудно представить, как можно создать такую установку в шахте. Принципиальное значение для развития нейтринной астрофизики высоких энергий имело предложение Маркова [8] по созданию больших оптических детекторов для регистрации нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в естественных водоемах. В таких установках природная вода океана или глубокого моря должна одновременно служить мишенью для нейтрино, средой, в которой распространяется черенковское излучение рождающихся при взаимодействии заряженных частиц, а также защищать от

фона космических лучей. Для регистрации черенковского излучения необходимо создать глубоко под водой пространственную решетку высокочувствительных приемников света – оптических модулей. Возможность практической реализации этого предложения начала обсуждаться в середине 1970-х гг. В результате проведения нескольких рабочих совещаний был предложен проект создания глубоководного детектора мюонов и нейтрино около Гавайских островов (Проект DUMAND) [9], однако на практике создание глубоководного нейтринного телескопа в условиях открытого океана оказалось слишком сложным. В результате, после нескольких неудачных попыток развертывания элементов установки DUMAND американские специалисты – основные участники проекта – решили, что проще и надежнее создавать установку для регистрации нейтрино высоких энергий на Южном полюсе в антарктическом льду. Вначале была успешно создана установка AMANDA [10], которая включала в себя 677 оптических модулей, распределенных на 19 тросах в толще льда в диапазоне глубин 800–2000 м. Сейчас идет поэтапное развертывание установки IceCube [11], в которой будет уже 4800 оптических модулей на 80 тросах в объеме около кубического километра.

Развитие Байкальского нейтринного проекта связано с предложением Чудакова использовать ледовый покров озера для проведения монтажных операций при отработке методики глубоководной регистрации нейтрино. При этом в начале 1980 г. казалось, что Байкал не совсем подходит для создания крупномасштабного нейтринного телескопа, в первую очередь, из-за большого фона атмосферных мюонов. Тем не менее, успехи в развертывании и эксплуатации первых черенковских детекторов на Байкале, разработка методов выделения нейтринных событий из мюонного фона, а также благоприятные природные условия стали основой для создания первого нейтринного телескопа НТ200 [12], который был введен в эксплуатацию в 1998 г. В 2005 г. были завершены работы по значительному увеличению эффективного объема и совершенствованию Байкальского нейтринного телескопа (создание установки НТ200+) [13]. В настоящее время начаты предварительные исследования с целью создания на оз. Байкал гига-тонного водного детектора (ГВД) объемом около кубического километра [14].

Природная вода является неотъемлемой частью Байкальского нейтринного телескопа – ее свойства (прозрачность, световой фон, температура и т. д.) и происходящие в озере процессы (течения, седиментация и др.) существенно влияют на работу установки. Поэтому с самого начала существенное место в Байкальском нейтринном проекте занимали исследования «среды обитания» установки. Развитие новых методик непрерывных измерений на стационарных буйковых станциях, создание высокоточных приборов позволило получить много уникальных данных о развитии гидрофизических и биогеохимических процессов в оз. Байкал.

### Байкальский глубоководный нейтринный телескоп

Действующие в настоящее время Байкальские нейтринные телескопы НТ200 и НТ200+ (рис. 1) расположены в 3.5. км от берега в районе 106 километра КБЖД на Южном Байкале. Глубина в этом месте составляет около 1370 м. В целом, установки представляют собой сеть притопленных буйковых станций (БС), на которых размещаются оптические модули (ОМ), регистрирующие черенковское излучение релятивистских заряженных частиц, родившихся в результате взаимодействия нейтрино с веществом; электронные модули, предназначенные для обработки поступающих от ОМ сигналов и связи с береговым центром, а также различные гидроакустические, гидрооптические, гидрологические и другие приборы. Все БС имеют три основных конструктивных элемента: якорь весом 300–800 кг, прикрепленный к нему стальной или синтетический канат (в некоторых случаях так называемый кабель-трос) и один или несколько буев, самые верхние буй находятся на глубине около 15 м. В первом Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ200 96 пар ОМ размещены поровну на 8 БС, образуя «гирлянды» (рис. 2), из которых 7 периферийных распределены равномерно по окружности радиусом 21.5 м и зафиксированы на концах стеклопластиковых труб, которые, в свою очередь, крепятся к стальной раме на центральной гирлянде установки на глубине 1100 м. Оптические модули – это это – стеклянные сферы диаметром около 50 см, внутри которых находятся фотоприемники «Квазар» [15] с диаметром фотокатода 37 см (рис. 3). Порог срабатывания электроники настроен на регистрацию отдельных фотонов. Для уменьшения фоновой

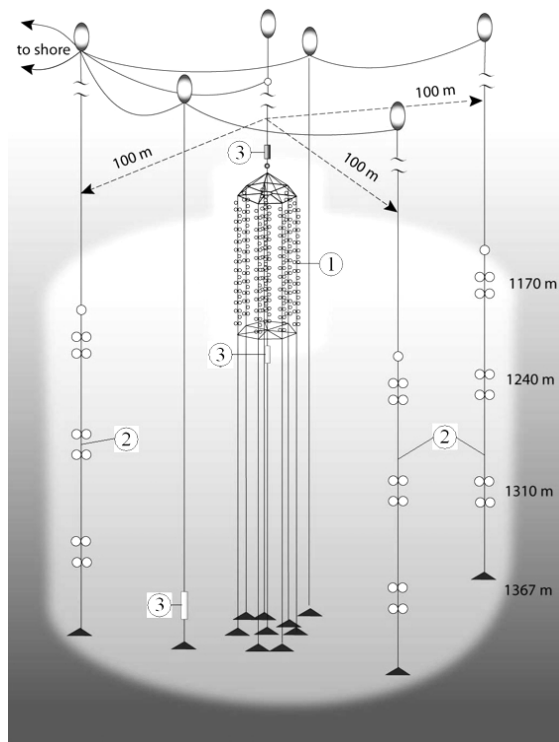


Рис. 1. Байкальский глубоководный нейтринный телескоп: 1 – нейтринный телескоп НТ200; 2 – внешние гирлянды нейтринного телескопа НТ200+; 3 – калибровочные лазеры.

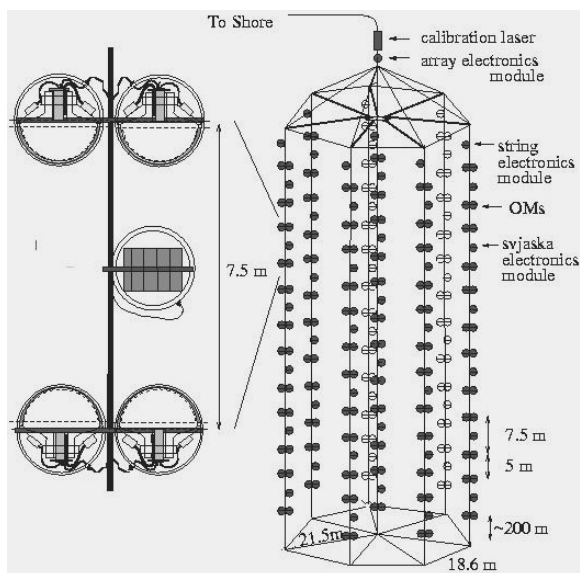


Рис. 2. Нейтринный телескоп NT200, слева – связка из четырех оптических модулей.

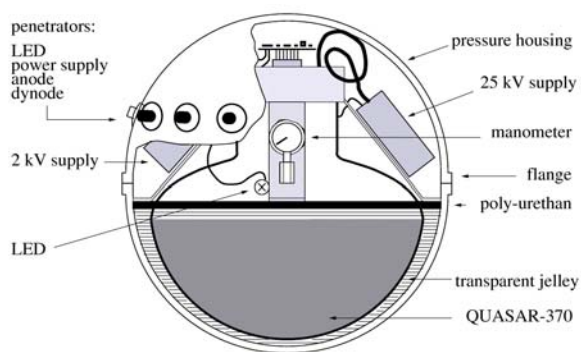


Рис. 3. Оптический модуль.

загрузки, которая может достигать нескольких сотен килогерц и обусловлена темновым током фотоприемников «Квазар» и свечением водной среды. Оптические модули объединены в пары и включены на совпадение с временным окном 20 нс. Пара ОМ образует измерительный канал. Две пары ОМ вместе со стеклянной сферой с электроникой, в которой проводится первичная обработка сигналов от ОМ, в частности, вырабатываются сигналы о совпадениях в каналах, – локальные триггеры (ЛТ) – образуют связку (рис. 2). Все ЛТ передаются в блоки электроники гирлянды (БЭГ), расположенные на том же тросе и обслуживающие по три связки. При этом передний фронт ЛТ, суть логического сигнала, несет информацию о времени срабатывания канала, которое измеряется с точностью порядка нескольких наносекунд, а длительность ЛТ пропорциональна суммарной амплитуде сигнала в канале. Далее сигналы о наличии ЛТ поступают в блок электроники детектора (БЭД), в котором вырабатывается управляющий сигнал при наличии не менее 3 ЛТ в течение временного окна 500 нс (примерно удвоенное время прохождения мюонов через NT200). БЭД расположен на центральной гирлянде вместе с еще несколькими электронными модулями, обеспечивающими обмен информацией с береговым центром (БЦ). Информация о временах и амплитудах сработавших каналов в «плотной» установке NT200 позволяет восстанавливать различные события. Для этого так-

же требуется знать положение в пространстве всех ОМ установки с точностью порядка 20 см. Эта информация получается с помощью гидроакустической системы измерения координат (ГАСИК), включающей шесть донных акустических маяков, расположенных на окружности радиусом 600 м вокруг NT200, а также приборы, которые запрашивают маяки и принимают ответные сигналы [16]. Эффективный объем NT200 недостаточен для регистрации с приемлемой статистикой астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий, что является наиболее важной задачей для всех крупномасштабных детекторов нейтрино в естественных средах. В то же время, при взаимодействии с водой нейтрино с энергией, например, 10 ПэВ образуется каскад релятивистских заряженных частиц, которые генерируют порядка  $10^{12}$  фотонов. В глубинной байкальской воде, где величина длины рассеяния света, как правило, лежит в пределах 30–70 м, а длины поглощения составляют 20–24 м [17], такую яркую вспышку можно зарегистрировать с расстояния в 100–200 м. Поэтому в Байкале для изучения потоков астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий можно использовать достаточно редкую «решетку» ОМ с характерным расстоянием несколько десятков и даже сотен метров. Именно эта идея использована при создании нейтринного телескопа NT200+, который, кроме NT200, включает в себя три внешние гирлянды, расположенные в вершинах правильного треугольника на расстояниях 100 м от центра NT200 с 12 ОМ на каждой гирлянде. Эта же идея делает возможным и создание ГВД при относительно небольших затратах и в разумные сроки. При создании NT200+ была экспериментально проверена новая идеология обмена информацией между береговым центром и подводным оборудованием Байкальского нейтринного телескопа [25]. Аппаратно она основана на использовании промышленных DSL-модемов и так называемых одноплатных компьютеров, размещаемых под водой, что позволяет увеличить скорость обмена информацией более чем на порядок по проложенным по дну кабелям. Эти же кабели используются для электропитания подводного оборудования. Одна из наиболее сложных экспериментальных задач – временная синхронизация измерительных каналов подводных детекторов с точностью несколько наносекунд. Она решается с помощью быстрых лазеров, засвечивающих ОМ-установки (рис. 1).

### Избранные результаты, полученные с помощью БГНТ

Основные задачи, которые в настоящее время решаются в рамках Байкальского нейтринного проекта:

- изучение угловых и энергетических спектров атмосферных мюонов;
- изучение угловых спектров атмосферных нейтрино; слабо взаимодействующие массовые частицы
- поиск гипотетических частиц (WIMP, тяжелые магнитные монополи и т. д.);
- поиск астрофизических нейтрино высоких энергий;
- долговременный мониторинг гидрофизических процессов в оз. Байкал.

Для решения каждой задачи подбирается свой алгоритм, который позволяет наилучшим образом выделить события данного типа из общего потока информации, получаемого с помощью БГНТ.

#### Угловые и энергетические спектры атмосферных мюонов

Мюоны, родившиеся в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) и способные пройти в воде несколько километров, составляют основной фон для регистрации нейтрино с помощью глубоководных установок. На глубине 1000 м поток атмосферных мюонов превышает поток мюонов от атмосферных нейтрино примерно в миллион раз. С другой стороны, результаты измерения угловых и энергетических спектров атмосферных мюонов с помощью НТ200 можно использовать для проверки моделей взаимодействия космических лучей высоких энергий и прохождения мюонов в веществе, а также для калибровки НТ200. Методика восстановления треков мюонов приведена в [18].

#### Угловые спектры атмосферных нейтрино

Основной метод регистрации атмосферных нейтрино, т. е. нейтрино, родившихся в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой, состоит в поиске прошедших через НТ200 мюонов из нижней полусферы. Такие частицы рождаются в результате взаимодействия где-то под установкой двигавшихся «снизу вверх» мюонных нейтрино. В результате обработки данных за период с 1998 по 2002 г. (1038 дней наблюдений) выделено 372 нейтринных события. Их распределение на небесной сфере в галактических координатах представлено на рис. 4 [19].

#### Поиск нейтрино от аннигиляции WIMP

Слабовзаимодействующие массивные элементарные частицы (WIMP) [20] являются наиболее популярными кандидатами на роль «темной материи». Идея их поиска с помощью БГНТ состоит в следующем. Если WIMP существуют, они могут накапливаться в центре массивных объектов, таких как Земля или Солнце, и с некоторой вероятностью аннигилировать, причем одним из конечных продуктов аннигиляции должны быть нейтрино. В результате взаимодействия со средой этих нейтрино могут родиться мюоны, которые должны двигаться почти вертикально снизу вверх. Для выделения таких событий из числа зарегистрированных НТ200+

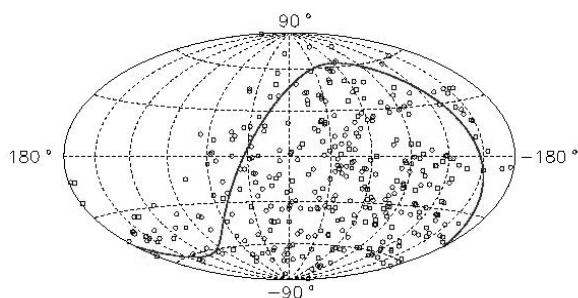


Рис. 4. Распределение на небесной сфере (в галактических координатах) нейтринных событий. Сплошная линия – положение экватора.

разработаны специальные критерии [21]. Энергетический порог для этого анализа составляет 10 ГэВ, эффективная площадь – 1800 м<sup>2</sup>. За 1038 дней наблюдений зарегистрировано 48 мюонов, траектории которых имеют зенитный угол  $\theta$  в диапазоне углов  $-1 < \cos \theta < -0.75$ . Гистограмма распределения событий по углам приведена на рис. 5 [20]. Там же сплошной и пунктирной линиями показано распределение ожидаемых событий, связанных с атмосферными мюонами в случае, если существуют осцилляции нейтрино с параметрами  $\delta M^2 = 2.5 \cdot 10^{-3}$  эВ и  $\theta_m \approx \pi/4$  (без осцилляций было бы 73.1 события).

#### Поиск быстрых магнитных монополей.

Еще один тип гипотетических элементарных частиц – магнитные монополи. В современную физическую теорию понятие магнитного монополя было введено в 1931 г. Дираком [22]. Заряд монополей Дирака  $g = 68.5e$ . При скорости движения в воде  $V > 0.75$  ( $C$  – скорость света в вакууме) они должны излучать в 8400 раз больше черенковских фотонов, чем одиночные мюоны. Оптические модули БГНТ способны регистрировать такие яркие объекты с расстояний вплоть до 100 м, при этом может быть засвечено большое число каналов установки. С другой стороны, монополи массой  $10^7 - 10^{14}$  ГэВ остаются релятивистскими, даже после того как они пройдут Землю. Поэтому стратегия поиска монополей состоит в отборе событий с числом сработавших каналов не менее 30, при этом объект должен двигаться из нижней полусферы. Далее отобранные события проверяются с помощью специальных «монопольных» критериев [23], которые позволяют исключить фоновые события, связанные с прохождением атмосферных мюонов высокой энергии, групп мюонов и т. д., и по возможности сохранить «монопольные» события. За 1038 суток чистого времени работы телескопа событий, удовлетворяющих критериям отбора магнитного монополя, не обнаружено [23]. Это позволило установить предел на поток магнитных монополей. Для  $V/C=1$  предел на поток равен  $F_{\text{мон}} < 0.46 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ .

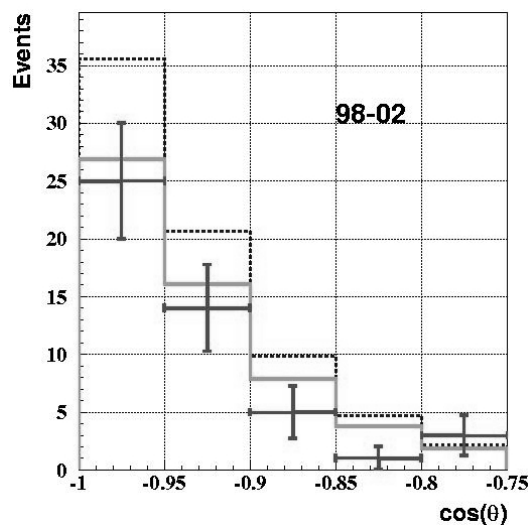


Рис. 5. Угловое распределение околорезультативных нейтринных событий и их ожидаемые распределения в случаях с осцилляциями без них (сплошная и пунктирная линии соответственно).

*Поиск астрофизических нейтрино высоких энергий*

Центральной задачей для нейтринных телескопов в природных средах является поиск нейтрино сверхвысоких энергий. Здесь важно, что поток атмосферных нейтрино быстро ослабевает с ростом энергии, поэтому при энергиях выше 0.1–1 ТэВ появляется возможность поиска и выделения нейтрино от астрофизических источников. Идея нашего метода состоит в поиске сигналов от каскадных ливней, возникающих при взаимодействии нейтрино под установкой. Оптические свойства байкальской воды таковы, что эффективный объем для регистрации и выделения каскадов из фона при высоких энергиях существенно превышает объем установки. Так, при энергии каскада 200 ТэВ он в 10 раз превышает объем НТ200 и становится равным 106 м<sup>3</sup>. За 1038 суток чистого времени наблюдения статистически значимого превышения над фоном от каскадов, порожденных атмосферными мюонами, не обнаружено. Это позволило поставить предел на диффузный поток нейтрино сверхвысоких энергий. Для энергетического спектра нейтрино в источнике, который подчиняется степенному закону с показателем степени 2, наше ограничение представлено на рис. 6. [24].

**Перспективы Байкальского нейтринного проекта**

*Гигатонный водный детектор на оз. Байкал*

Размер существующей в настоящее время на Байкале установки недостаточен для регистрации нейтрино высоких энергий от многих астрофизических источников [25]. В последние годы начаты эксперименты, направленные на создание на оз. Байкал гигатонного водного детектора (НТ1000) для регистрации каскадов с энергией выше 100 ТэВ, при этом его эффективный объем составит 0.5–0.8 км<sup>3</sup> [14]. Важно, что при большой длине и узкой индикатрисе рассеяния света, характерных для глубинных байкальских вод, для регистрации нейтрино высоких энергий

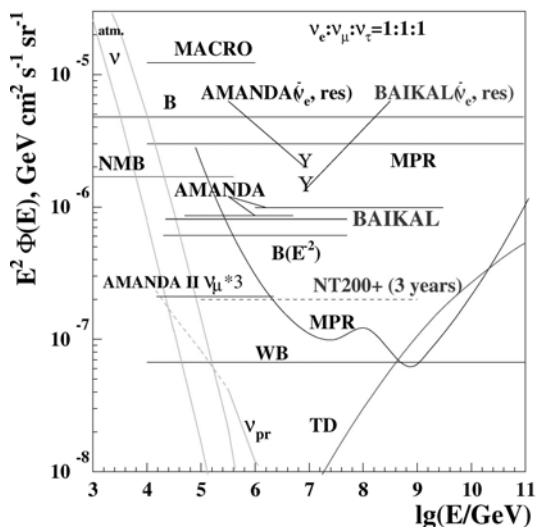


Рис. 6. Экспериментальные и теоретические ограничения на величину суммарных по всем типам нейтрино диффузных потоков для степенного спектра E<sup>-2</sup>.

оптические приемники можно располагать относительно редко. В результате проектируемый ГВД будет включать в несколько раз меньше фотоумножителей, чем создаваемая в настоящее время на Южном полюсе установка IceCube [11]. Также у Байкала есть много других преимуществ, например, несравнимо дешевле транспорт и развертывание. ГВД будет состоять из 90–100 гирлянд длиной 300–350 м с 12–16 ОМ на каждой гирлянде и с общим числом модулей 1300–1700. Расстояние между гирляндами будет около 100 м (рис. 7). Новый телескоп позволит осуществлять поиск нейтрино сверхвысоких энергий на уровне чувствительности к потокам, величина которых в несколько раз ниже предела Ваксмана–Бакала [27], более чем на порядок понизить предел на поток быстрых магнитных монополей или зарегистрировать их а также решить другие задачи астрофизики и физики высоких энергий.

*Развитие методики акустической регистрации*

В работах [28, 29] показано, что при рождении ливней высоких энергий в воде должны возникать биполярные акустические импульсы длительностью несколько десятков микросекунд, что можно использовать для регистрации нейтрино высоких энергий в море или в оз. Байкал. В условиях Байкала при энергии ливня 10<sup>19</sup> эВ амплитуда импульсов на расстоянии 100 м от ливня в направлении, перпендикулярном к его оси, должна быть порядка 10 мПа. Преимущества метода связаны со слабым затуханием звука в воде, поэтому акустический детектор нейтрино сверхвысоких энергий может содержать значительно меньшее число измерительных каналов, чем черенковская установка при том же эффективном объеме.

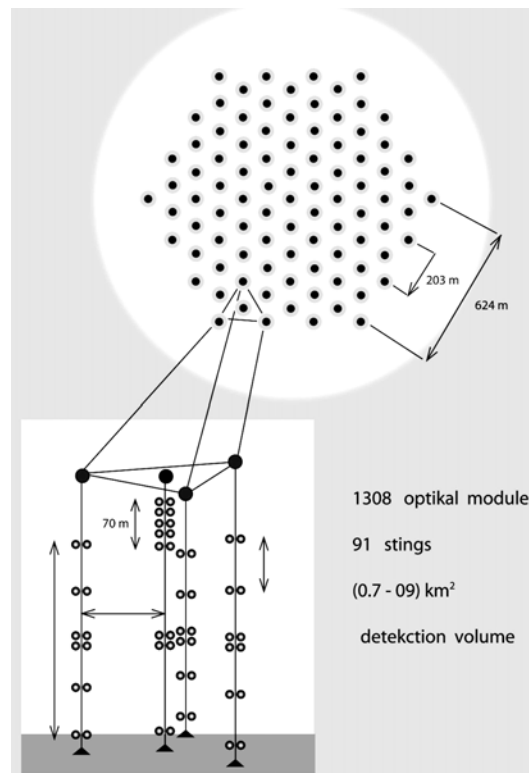


Рис. 7. Вид сверху на проектируемый гигатонный водный детектор. В левом углу показана ячейка установки, представляющая собой аналог существующего НТ200+.

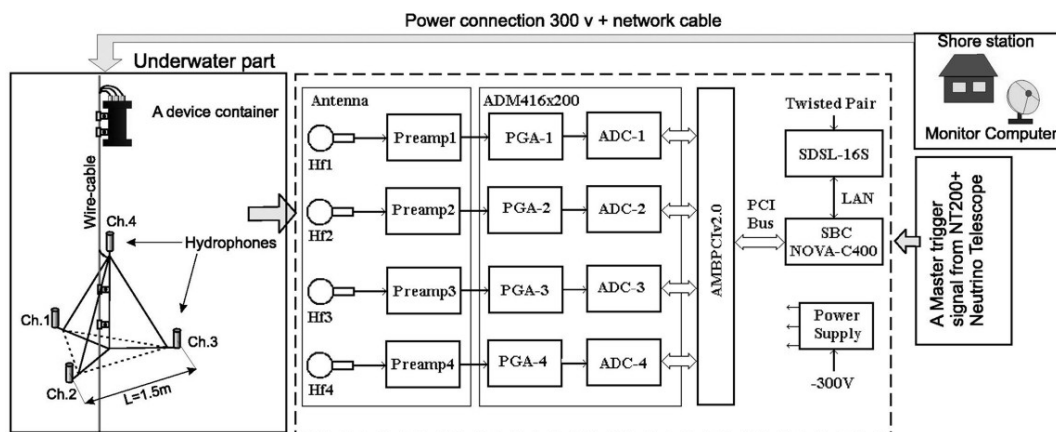


Рис. 8. Схематическое изображение и блок-схема четырехканального глубоководного модуля для акустической регистрации нейтрино сверхвысоких энергий.

Исследования с целью определения возможности акустической регистрации нейтрино сверхвысоких энергий на Байкале были начаты в 2000 г. За прошедшее время накоплен большой опыт измерений акустических сигналов, восстановления координат их источников, а также изучены основные особенности фона [30]. С учетом полученных знаний разработан и изготовлен четырехканальный глубоководный цифровой прибор (рис. 8) [31], который может рассматриваться как прототип элементарной ячейки будущего глубоководного акустического детектора нейтрино. Антенна прибора состоит из четырех гидрофонов, которые расположены в вершинах правильной четырехгранной пирамиды с длиной ребра 1.5 м. Усиленные сигналы с гидрофонов оцифровываются с шагом по времени 5 мкс и анализируются под водой с помощью микрокомпьютера Nova-C400.

Непрерывный поиск редких «нейтриноподобных» импульсов малой длительности ( $\tau < 50$  мкс) на фоне постоянного шума среды осуществляется с помощью специального алгоритма [32]. Он позволяет восстанавливать направление на квазилокальные импульсные источники звука с точностью порядка  $1^\circ$  и значительно подавить фон, связанный с имитацией сигнала за счет других источников. В 2006 г. впервые осуществлена стационарная установка прибора на глубине 100 м. Небольшая глубина установки выбрана для того, чтобы «прослушивать» глубинные слои озера, где количество источников звука невелико, по крайней мере, в Байкале. Для уменьшения акустического фона из верхней полусферы над гидрофонами установлены звукопоглощающие колпаки. В результате предварительной обработки экспериментальных данных подтвердилось, что при значительном фоне шумовых импульсов из верхней полусферы (шумы от волн, судоходства, подвижки и растрескивания льда и т. д.), а также под небольшими углами к горизонту из нижней полусферы (за счет рефракции) биполярные импульсы снизу пока не наблюдались (рис. 9) [33].

#### Исследование динамических процессов в оз. Байкал

В рамках Байкальского нейтринного проекта появились принципиально новые возможности исследо-

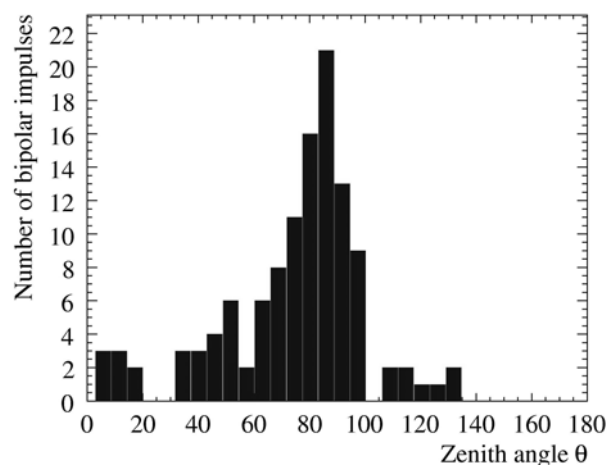


Рис. 9. Распределение по зенитному углу зарегистрированных биполярных импульсов.

вания динамических процессов в озере на основе технологий постановки со льда притопленных буйковых станций, в том числе связанных с береговым центром кабельными линиями связи, а также создания высокочувствительных приборов и новых методов наблюдений. В результате проведенных исследований было открыто явление собственного свечения его водной среды, изучена природа, предложен метод использования свечения как инструмента для исследования гидрофизических процессов [34], детально изучены оптические свойства байкальской воды [35]. В сотрудничестве с EAWAG (Швейцария) и DESY-Zeuthen (Германия) с помощью распределенных на трех буйковых станциях гидрофизических приборов получен ряд новых результатов о горизонтальном и вертикальном обмене вод в оз. Байкал. Например, экспериментально доказано, что основной вклад в обновление глубинных вод вносит присклоновое опускание вод, инициированное процессами в атмосфере [36].

В последние годы совместно с ИСЗФ СО РАН предложена и экспериментально проверена методика акустического зондирования больших водных объемов с помощью частотно-манипулированных сигналов. В этом методе информация о свойствах среды восстанавливается на основе данных о вариациях фазы сигнала и искажениях формы импульсов



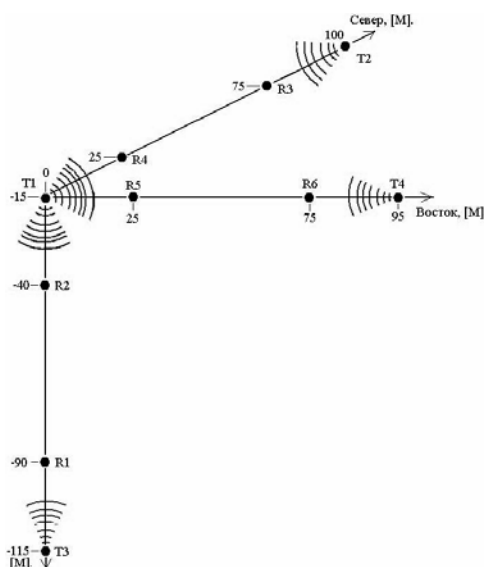


Рис. 10. Схема эксперимента по акустическому зондированию с помощью частотно-манипулированных сигналов. T1–T4 – излучающие гидрофоны, R1–R6 – приемные гидрофоны.

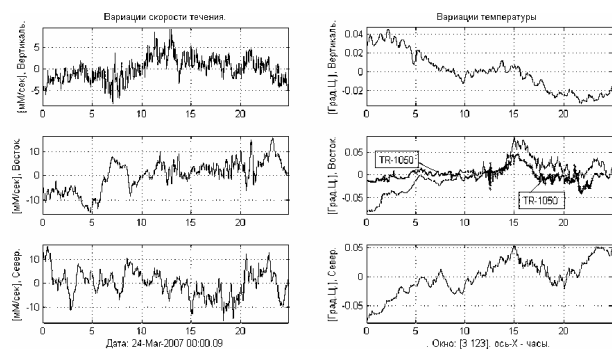


Рис. 11. Пример суточного хода вариаций течений и температуры на вертикальной и горизонтальной трассах. Жирная линия – результат измерения температуры с помощью прибора TR1000, находившегося в середине трассы

за счет частотной дисперсии затухания [37], а именно, для регистрации малых вариаций параметров водной среды предлагается анализировать изменение полной формы узкополосных импульсных сигналов. Натурные измерения проводились со льда в 500 м от берега на двух горизонтальных и вертикальной трассах, каждая длиной порядка 100 м. (рис. 10). На рис. 11 приведены примеры суточного хода вариаций течений и температуры на вертикальной и горизонтальной трассах. Приведенные здесь результаты являются первым экспериментальным измерением вертикальной компоненты скорости движения воды в верхнем слое Байкала, которая, как оказалось, при среднем значении модуля скорости 2–3 мм/с, может несколько раз в течение суток менять знак и достигать величины 5–7 мм/с. Сравнение представленных на рис.11 и других результатов измерений в разные дни и на разных трассах свидетельствует о высокой динамической активности в диапазоне глубин 0–100 м и значительном разнообразии наблюдаемых гидрофизических процессов, когда вариации температуры и течений находятся в фазе, противофазе, а частотный спектр

наблюдаемых явлений достаточно широк. Вместе с тем, некоторые результаты наших измерений оказались совершенно неожиданными и не известными ранее. Они указывают на сильную зависимость искажений формы акустических сигналов от рабочей частоты (частотная дисперсия). Это, во многом еще не понятное и не объясненное свойство акустических сигналов, возможно, даст весьма чувствительный метод мониторинга свойств водной среды в оз. Байкал на системе эталонных акустических трасс. Результаты первых тестовых испытаний метода акустического зондирования частотно-манипулированными сигналами дает основание надеяться, что такой подход может стать мощным инструментом изучения различных гидрофизических процессов. С помощью такого метода можно наблюдать вариации температуры с разрешением до  $10^{-4}$  град, и скорости течений до 1 мм/с.

### Заключение

Успехи в создании крупномасштабных установок для исследования потоков нейтрино высоких энергий и поиска новых видов материи позволяют надеяться, что в ближайшие годы будут совершены важные открытия в области астрофизики и физики высоких энергий. Более того, использование новых экспериментальных методов позволит получить новые знания о природных процессах в местах развертывания нейтринных телескопов, в том числе об оз. Байкал.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 05-05-97262, 05-02-16593, 07-02-10009, 07-02-00791), Федерального агентства по науке и инновациям, (госконтракт 02.515.11.5079), программ «Фундаментальные исследования и высшее образование» (проект НОЦ-017 «Байкал») и «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)» (проект РНП.2.2.1.1.7334).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Davis R., Harmer D.S., Hoffinan K.C. // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 20. P. 1205.
2. Bellerive A. Review of solar neutrino experiment // arXiv:hep-ex/0312045 v1 16 Dec 2003.
3. Kirsten T.A. Solar neutrino experiments: Results and implications // Rev. Mod. Phys. 1999. V. 71, N 4, July. P. 1213–1232.
4. Srubabati G. Solar Neutrino Experiments: An Overview // arXiv:hep-ph/0303075 v1.
5. Koshiha M. Observational neutrino astrophysics // Phys. Reports. 1992. V. 200, N 5–6. P. 229–381.
6. McKeown R.D., Vogel P. Neutrino masses and oscillations: Triumphs and challenges // Phys. Reports. 2004. V. 394. P. 315–356.
7. Superkamiokande Collaboration // Phys. Lett. 1998. V. B433. P. 9.
8. Markov M.A. On high energy neutrino physics // Proc. 1960 Annual International Conference on High Energy Physics. Rochester, 1960. P. 578.
9. DUMAND Collaboration. DUMAND II, proposal to construct a deep-ocean laboratory for the study of high-energy neutrino astrophysics, and particle physics // HDC-2-88. The international DUMAND. University Hawaii. Aug. 1988.
10. Halzen F. The AMANDA neutrino telescope // New Astron. Rev. 1998. V. 42. P. 289–299.

11. Ahrens J. et al. // *Astrop. Phys.* 2004. V. 20. P. 507. arXiv:astro-ph/0305196.
12. Belolapnikov I.A. et al. The Baikal neutrino telescope: Design, performance and first results // *Astroparticle Phys.* 1997. V. 7. P. 263.
13. Aynutdinov V.M. et al. The BAIKAL neutrino experiment: From NT200 to NT200+ // *NIM A.* 2006. V. 567. P. 433–437. e-Print Archive: astro-ph/0507709. arXiv:astro-ph/0609743v1.
14. Aynutdinov V.M. et al. Baikal neutrino telescope // *Phys. Atom. Nucl.* 2006. V. 69. P. 1914–1921. arXiv:0710.3063.
15. Bagduev R.I. et al. The optical module of the Baikal deep underwater neutrino telescope // *NIM A.* 1999. V. 420. P. 138–154. e-Print: astro-ph/9903347.
16. Айнутдинов В.М. и др. Гидроакустическая система измерения координат Байкальского нейтринного телескопа NT-200 // *Акустический журнал.* 2005. Т. 55, № 6. С. 721–731.
17. Balkanov V. et al. Simultaneous measurement of water optical properties by AC9 transmissometer and ASP-15 inherent optical properties meter in Lake Baikal // *Nucl. Instrum. Meth.* 2003. V. A298. P. 231–239.
18. Bezrukov L.B. Track reconstruction and background rejection for the Lake Baikal neutrino telescope NT-200 // *Proc. of the XXIII ICRC, Calgary 1993.* Calgary: University of Calgary, 1993. V. 4. P. 577–580.
19. Aynutdinov V.M. et al. BAIKAL experiment: Main results obtained with the neutrino telescope NT200 // *NIM A.* 2006. V. 567. P. 423–427.
20. Bottino A. et al. // *Astroparticle Phys.* 1995. V. 3. P. 65.
21. Balkanov V. et al. Searches for almost vertically up-going muons in a Lake Baikal deep-underwater experiment // *Yad. Fiz.* 1999. V. 62. P. 1015–1025.
22. Dirac P.A.M. // *Proc. Roy. Soc. London.* 1931. V. A133. P. 60.
23. Aynutdinov V.M. Search for relativistic magnetic monopoles with the Baikal Neutrino Telescope NT200 // *Proc. of 29th ICRC. Pune. India.* 3–11 Aug 2005. e-Print: astro-ph/0507713.
24. Aynutdinov V.M. Search for a diffuse flux of high-energy extraterrestrial neutrinos with the NT200 neutrino telescope // *Astroparticle Phys.* 2006. V. 25. P. 140–150.
25. Березинский В.С., Зацепин Г.Т. Возможности экспериментов с космическими нейтрино очень высоких энергий: проект ДЮМАНД // *УФН.* 1977. Т. 122. С. 3–36.
26. Aynutdinov V.M. et al. Baikal neutrino telescope NT200+: Upgrade of data acquisition and time calibration systems // *Proc. of 29th ICRC. Pune, India,* 3–11 Aug 2005. e-Print: astro-ph/0507715.
27. Waxman E., Bahcall J. // *Phys. Rev.* 1999. V. D59. P. 023002.
28. Аскарьян Г.А., Долгошеин Б.А. Акустическая регистрация нейтрино высоких энергий // *Письма в ЖЭТФ.* 1977. Т. 25. Вып. 5. С. 232–233.
29. Askariyan G.A. et al. Acoustic detection of high energy particles showers in water // *Nucl. Instr. and Methods.* 1979. V. 164. N. 2. P. 267–278.
30. Айнутдинов В.М. и др. Высокочастотные акустические шумы озера Байкал // *Акустический журнал.* 2006. Т. 52, № 5.
31. Aynutdinov V.M. et al. A device for detection of acoustic signals from super high energy neutrinos // *Int. J. of Modern Phys.* 2006. V. 21. N supp01 (July 2006). P. 202–206.
32. Буднев Н.М. и др. Глубоководный 4-канальный цифровой прибор для регистрации акустических сигналов с заданными свойствами // *Сб. трудов XVIII сессии Российского акустического общества.* Т. II. М.: ГЕОС, 2006. С. 298–302.
33. Aynutdinov V.M. et al. A prototype device for acoustic neutrino detection in Lake Baikal // *Proc. 30th ICRC. Merida, Yucatan, Mexico,* 3–11 July, 2007. e-Print: arXiv:0710.3113 [astro-ph].
34. Безруков Л.Б. и др. Свечение водной среды оз. Байкал – инструмент исследования динамики озера // *Известия АН. Физика атмосферы и океана.* 1998. Т. 34, № 1. С. 97–103.
35. Гапоненко О.Н., Миргазов Р.Р., Таращанский Б.А. Определение первичных гидрооптических характеристик по световому полю точечного источника // *Оптика атмосферы и океана.* 1997. Т. 10. № 3. С. 234–244.
36. Schmid M., Budnev N.M., Granin N.G., et al. Lake Baikal deepwater renewal mystery solved // *Geophys. Res. Lett.* 2008 (in print).
37. Орлов И.И., Ильин Н.В. // *Оптика атмосферы и океана.* 1994. Т. 7, № 11–12. С. 1585–1591.

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва

<sup>4</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>5</sup>ДЭЗИ-Цойтен, Германия

<sup>6</sup>Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород

<sup>7</sup>Морской государственный университет, Санкт-Петербург

<sup>8</sup>Курчатовский институт, Москва

<sup>9</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск