

---

## Baikal Neutrino Project – history & prospects



**N.M. Budnev** – director of Applied Physics Institute of Irkutsk State University. The basic fields of research are neutrino physics and physical processes in Lake Baikal.

---

**Abstract:** The lecture presents a brief survey of history, current status and perspectives of the Baikal neutrino project. The main physical results obtained with the neutrino telescopes NT200 and NT200+ are reviewed.

---

# Байкальский нейтринный проект – история и перспективы

В.М. Айнутдинов<sup>1</sup>, А.В. Авронин<sup>1</sup>, В.А. Балканов<sup>1</sup>, И.А. Белолаптиков<sup>4</sup>,  
Д.Ю. Богородский<sup>2</sup>, Н.М. Буднев<sup>21</sup>, Р. Вишневский<sup>5</sup>, И.А. Данильченко<sup>1</sup>,  
Г.В. Домогацкий<sup>1</sup>, А.А. Дорошенко<sup>1</sup>, А.П. Дьячок<sup>2</sup>, Ж.-А.М. Джилкибаев<sup>1</sup>,  
О.Н. Гапоненко<sup>1</sup>, К.В. Голубков<sup>4</sup>, О.А. Гресс<sup>2</sup>, Т.И. Гресс<sup>2</sup>, О.И. Гришин<sup>2</sup>,  
В.А. Жуков<sup>1</sup>, А.В. Загородников<sup>2</sup>, А.М. Клабуков<sup>1</sup>, А.И. Климов<sup>8</sup>,  
К.В. Конищев<sup>4</sup>, А.В. Коробченко<sup>2</sup>, А.П. Кошечкин<sup>1</sup>, Л.А. Кузьмичев<sup>3</sup>,  
В.Ф. Кулепов<sup>6</sup>, С.П. Михеев<sup>1</sup>, Т. Миколайский<sup>5</sup>, Е. Миддел<sup>5</sup>, М.Б. Миленин<sup>6</sup>,  
Р.Р. Миргазов<sup>2</sup>, Э.А. Осипова<sup>3</sup>, А.Л. Паньков<sup>2</sup>, Л.В. Паньков<sup>2</sup>, А.И. Панфилов<sup>1</sup>,  
Д.П. Петухов<sup>1</sup>, Е.Н. Плисковский<sup>4</sup>, И.А. Портянская, П.Г. Похил<sup>1</sup>,  
В.А. Полещук<sup>1</sup>, Е.Г. Попова<sup>3</sup>, В.В. Просин<sup>3</sup>, М.И. Розанов<sup>7</sup>, В.Ю. Рубцов<sup>2</sup>,  
Е.В. Рябов<sup>2</sup>, Ю.А. Семеней<sup>2</sup>, С.И. Синеговский<sup>2</sup>, Б.А. Таращанский<sup>2</sup>,  
С.В. Фиалковский<sup>6</sup>, Б.К. Шайбонов<sup>4</sup>, А.В. Широков<sup>3</sup>, К. Шпиринг<sup>5</sup>

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

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

<sup>3</sup>НИИЯФ им. Д.В. Скobelьцына МГУ, Москва

<sup>4</sup>ОИЯИ, Дубна

<sup>5</sup>ДЭЗИ-Цойтен, Германия

<sup>6</sup>Нижегородский Государственный Технический Университет, Н-Новгород

<sup>7</sup>Санкт-Петербургский Морской Государственный Университет, С-Петербург

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

## Аннотация

*В лекции представлена история, текущий статус и перспективы Байкальского нейтринного проекта. Приводится обзор основных физических результатов, полученных с помощью нейтринных телескопов HT200 и HT200+.*

## Введение

К настоящему времени с помощью оптических, радио-, рентгеновских и гамма-телескопов получен огромный объем знаний об истории развития и строении Вселенной. В последние годы новым «окном» во Вселенную становится нейтринная астрономия. Многие астрофизические объекты от обычных звезд типа нашего

---

<sup>1</sup>nbudnev@api.isu.ru

Солнца до активных галактических ядер являются мощными источниками нейтрино в широком диапазоне энергий. В последние десятилетия создан ряд подземных установок [1]–[4] для изучения энергетического спектра солнечных нейтрино (характерная величина их энергии — 0.2–15 МэВ) и от других источников. В результате этих исследований была экспериментально проверена модель термоядерного синтеза внутри Солнца, впервые был зарегистрирован нейтринный сигнал от взрыва сверхновой [3] и открыты осцилляции нейтрино, что однозначно указывает на наличие не равной нулю массы нейтрино [4]. Самая крупная подземная установка Super-Kamiokande [4] имеет объем 52000 м<sup>3</sup>, но и такой объем не достаточен для регистрации астрофизических нейтрино от многих Галактических и внегалактических источников, для поиска новых форм материи, решения других фундаментальных задач астрофизики и физики элементарных частиц. Характерный размер детекторов для таких задач — кубический километр. Принципиальное значение для развития нейтринной астрофизики высоких энергий имело предложение М.А. Маркова [5] о создании больших оптических детекторов для регистрации нейтрино высоких и сверхвысоких энергий в естественных водоемах. В таких установках природная вода океана или глубокого моря одновременно служит мишенью для нейтрино, средой, в которой распространяется черенковское излучение рождающихся при взаимодействии заряженных частиц, и защитой от фона космических лучей. Для регистрации черенковского света необходимо создать глубоко под водой пространственную решетку высокочувствительных приемников света — оптических модулей. Возможность практической реализации этого предложения начала обсуждаться в середине 70-х годов, когда был подготовлен международный проект детектора мюонов и нейтрино около Гавайских островов (DUMAND). Однако на практике создание глубоководного нейтринного телескопа в условиях открытого океана оказалось слишком сложным. В результате, после нескольких неудачных попыток развертывания элементов установки DUMAND американцы, которые играли ключевую роль в проекте, решили, что проще и надежнее создавать установку для регистрации нейтрино высоких энергий на южном полюсе в антарктическом льду. Вначале была успешно создана установка AMANDA [6], которая включает в себя 677 оптических модулей, распределенных на 19 тросах в толще льда в диапазоне глубин 800 – 2000 м. А сейчас завершается поэтапное развертывание установки IceCube [7], в которой будет уже 4800 оптических модулей на 80 тросах в объеме около кубического километра. Развитие Байкальского нейтринного проекта связано с предложением А.Е Чудакова использовать ледовый покров озера для проведения монтажных операций при отработке методики глубоководной регистрации нейтрино. При этом в начале 80-х годов казалось, что Байкал недостаточно глубок для создания крупномасштабного нейтринного телескопа, в первую очередь, из-за большого фона атмосферных мюонов. Однако, 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 в мире глубоководного нейтринного телескопа НТ200 [8], который был введен в эксплуатацию в 1998 году. В 2005 году были завершены работы по значительному увеличению эффективного объема и совершенствованию Байкальского нейтринного телескопа (создана установка НТ200+) [9]. В настоящее время начаты предварительные исследования с целью создания на озере Байкал Гигантского водного детектора (НТ1000) объемом около кубического километра [10]. 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 уникальных высокоточных приборов позволило получить много уникальных данных о развитии гидрофизических и биогеохимических процессов в озере Байкал.

## 1 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-го км КБЖД на Южном Байкале, глубина в этом месте 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, закрепленный к нему стальной или синтетический канат (в некоторых случаях т.н. кабель-трос), и одну или несколько плавучестей – буев, самые верхние буи находятся на глубине около 15 м. В первом Байкальском глубоководном нейтринном телескопе НТ200 96 пар ОМ размещены поровну на 8 БС, образуя т.н. «гирлянды» (рис. 1), из них 7 периферийных гирлянд распределены равномерно по окружности с радиусом 21.5 м и зафиксированы к концам стеклопластиковых труб, которые, в свою очередь, крепятся к стальной раме на центральной гирлянде установки на глубине 1100 м. ОМ это – стеклянные сферы диаметром около 50 см, внутри которых находятся фотоприемники «Квазар» [11] с диаметром фотокатода 37 см. Порог срабатывания электроники настроен на регистрацию отдельных фотонов.

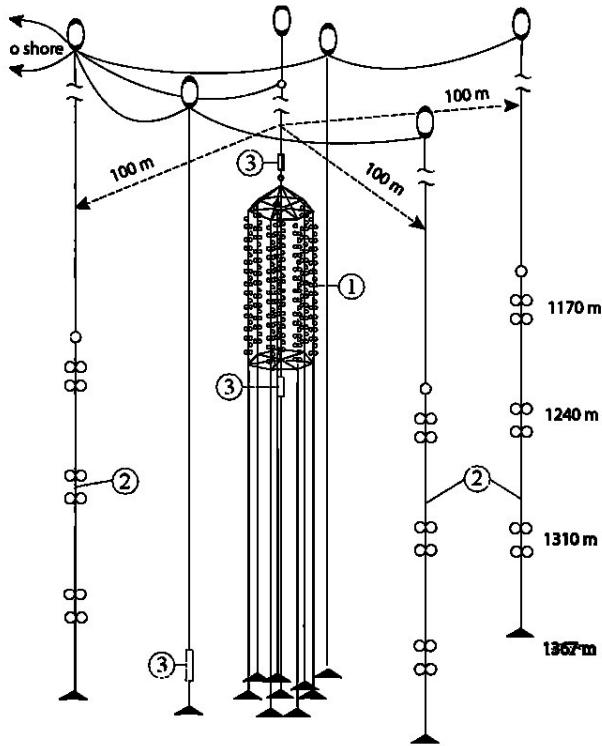


Рис. 1: Байкальский глубоководный нейтринный телескоп. 1 — нейтринный телескоп HT200, 2 — внешние гирлянды нейтринного телескопа HT200+, 3 — калибровочные лазеры.

в канале. Далее сигналы о наличии ЛТ поступают в блок электроники детектора (БЭД), в котором вырабатывается управляющий сигнал при наличии не менее 3-х ЛТ в течение временного окна 500 нс (примерно удвоенное время прохождения мюонов через HT200). 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 HT200 позволяет восстанавливать различные события. Для этого также требуется знать положение в пространстве всех ОМ установки с точностью порядка 20 см. Эта информация получается с помощью гидроакустической системы измерения координат (ГАСИК), включающей в себя 6 донных акустических маяков, расположенных на окружности с радиусом 600 м вокруг HT200, а также приборы, которые запрашивают маяки и принимают ответные сигналы [12].

Эффективный объем HT200 недостаточен для регистрации с приемлемой ста-

Для уменьшения фоновой загрузки, которая может достигать нескольких сот килогерц и обусловлена темновым током «Квазаров» и свечением водной среды, ОМ 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. 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

тистикой астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий, что является наиболее важной задачей для всех крупномасштабных детекторов нейтрино в естественных средах. В тоже время, при взаимодействии с водой нейтрино с высокой энергией, например, 10 ПэВ, образуется каскад релятивистских заряженных частиц, которые генерируют порядка 10<sup>12</sup> фотонов. В глубинной байкальской воде, где длина рассеяния света в пределах 30–70 м, а длины поглощения — 20–24 м [13], 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 в несколько десятков метров и даже 100 м. Именно эта идея использована при создании нейтринного телескопа НТ200+, который кроме НТ200 включает в себя 3 внешних гирлянды, расположенных в вершинах правильного треугольника на расстояниях 100 м от центра НТ200, на каждой гирлянде по 12 ОМ. Эта же идея делает возможным и создание ГВД при относительно небольших затратах и в разумные сроки. При создании НТ200+ была экспериментально проверена новая идеология обмена информацией между береговым центром и подводным оборудованием Байкальского нейтринного телескопа. Аппаратно она основана на использовании промышленных DSL-модемов и т. н. одноплатных компьютеров, размещаемых под водой, что позволило увеличить скорость обмена информацией более чем на порядок по проложенным по дну кабелям, эти же кабели используются для электропитания подводного оборудования. Одна из наиболее важных экспериментальных задач — временная синхронизация измерительных каналов подводных детекторов с точностью несколько наносекунд. Она решается с помощью коротких световых импульсов от лазеров, засвечивающих ОМ установки (рис. 1).

## 2 Избранные результаты, полученные с помощью БГНТ

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

- Характеристики потока атмосферных мюонов,
- Выделение событий от атмосферных нейтрино,
- Поиск гипотетических частиц ((WIMP, тяжелые магнитные монополи и т.д.),
- Поиск астрофизических нейтрино высоких энергий,
- Долговременный мониторинг гидрофизических процессов в озере Байкал.

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

## 2.1 Характеристики потока атмосферных мюонов

Мюоны от распадов мезонов и барионов, рождающихся в атмосфере при взаимодействии космических лучей с ядрами воздуха, способны пройти в воде несколько километров и составляют основной фон для регистрации нейтрино с помощью глубоководных установок. На глубине 1 км поток атмосферных мюонов превышает поток мюонов, генерируемых атмосферными мюонными нейтрино, примерно в миллион раз. С другой стороны, результаты измерения углового распределения и кривой поглощения атмосферных мюонов с помощью НТ200 можно использовать для проверки моделей взаимодействия космических лучей высоких энергий с ядрами и прохождения мюонов в веществе, а также для калибровки НТ200. На рис. 2 приведены ожидаемые спектры атмосферных мюонов на уровне моря, рассчитанные [14] с несколькими моделями нуклон-ядерных и мезон-ядерных взаимодействий при высоких энергиях (QGSJET II, SIBYLL и др.) для двух вариантов параметризации спектра первичных космических лучей. Здесь показана область энергий, где в качестве источников мюонов начинают доминировать распады очарованных частиц (кривые 1–4). Неопределенность этого вклада накладывается на недостаточно изученные особенности спектра космических лучей вблизи его «колена», которому отвечают энергии мюонов выше 3 ПэВ. Результаты исследования потоков мюонов важны также для вычисления фона для нейтринной астрономии высоких энергий, который в области высоких энергий определяется атмосферными нейтрино. Детальное сравнение потоков мюонов, рассчитанных в той же модели ядерного каскада (и с тем же первичным спектром), что и нейтрино, с результатами их измерения на уровне моря и под водой, позволило бы уточнить многие неизвестные или плохо известные параметры, необходимые для расчета ядерного каскада в атмосфере, и, следовательно, уменьшить неопределенности расчета потоков нейтрино.

## 2.2 Выделение событий от атмосферных нейтрино

Основной метод регистрации атмосферных нейтрино (т.е. нейтрино, родившихся в результате взаимодействия космических лучей с ядрами воздуха) состоит в поиске прошедших через НТ200 мюонов из нижней полусфера. Эти мюоны рождаются где-то под установкой в рассеянии на ядрах мюонных нейтрино, двигавшихся в направлении «снизу вверх». В результате обработки данных за период с 1998 по 2002 год (1008 дней наблюдений) выделено 372 нейтринных события [10]. Это число следует сравнивать с 385 событиями, связанными с атмосфер-

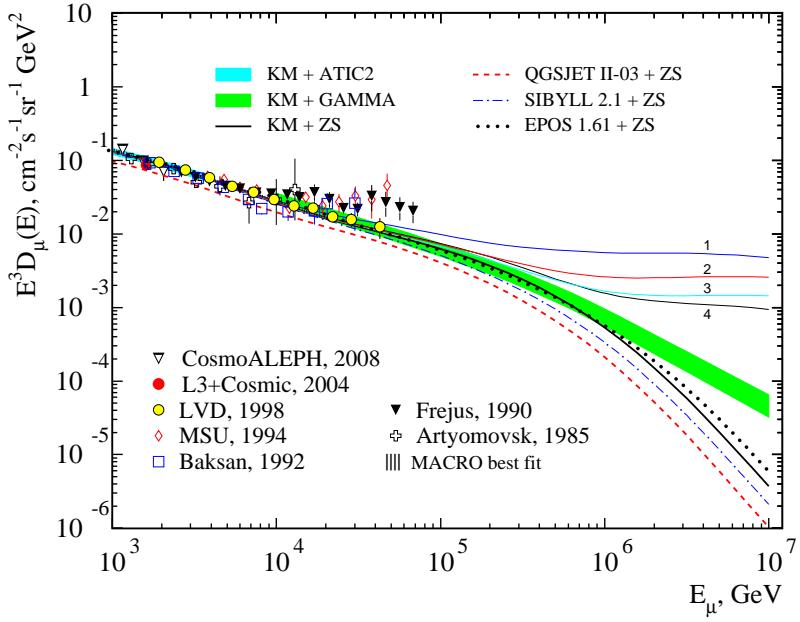


Рис. 2: Вертикальный спектр мюонов космических лучей на уровне моря, рассчитанный для нескольких моделей адронных взаимодействий при высоких энергиях.

ными нейтрино и фоновыми событиями от атмосферных мюонов, ожидаемыми в соответствии с результатами моделирования с использованием метода Монте-Карло.

### 2.3 Поиск нейтрино от аннигиляции WIMP

Слабовзаимодействующие массивные элементарные частицы (WIMP) являются наиболее популярными кандидатами на роль «темной материи». Идея их поиска с помощью Байкальского нейтринного телескопа состоит в следующем. Если WIMP существуют, то 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 рамках этой гипотезы ведется поиск нейтрино, пришедших в направлении на центр Земли и Солнца. Для выделения таких событий из числа зарегистрированных Байкальским телескопом из центра Земли разработаны специальные критерии [15]. Энергетический порог для этого анализа — 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  $-1 < \cos \theta < -0.75$ . Ожидаемое число событий, связанных с атмосферными мюонами в случае, если существуют

осцилляции нейтрино с параметрами  $\delta M^2 = 2.5 \cdot 10^{-2}$  эВ и  $\theta_m \approx \pi/4$ , должно быть 56.6, без осцилляций было бы 73.1 событие [10]. Также не обнаружено повышенного числа мюонов, пришедших в направлении от Солнца [16].

## 2.4 Поиск быстрых магнитных монополей

Еще один тип гипотетических элементарных частиц – магнитные монополи. В современную физическую теорию понятие магнитного монополя было введено в 1931 году Дираком. Заряд монополей Дирака  $g = 68.5e$ . При скорости движения в воде, близкой к скорости света в вакууме, магнитные монополи должны излучать в 8300 раз больше черенковских фотонов, чем одиночные мюоны (в расчете на единицу пути). Оптические модули БГНТ способны регистрировать такие яркие объекты с расстояний вплоть до 100 м, при этом может быть засвеченено большое число каналов установки. С другой стороны, монополи с 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, и объект должен двигаться из нижней полусфера. Далее отобранные события проверяются с помощью специальных «монопольных» критериев, которые позволяют исключить фоновые события, связанные с прохождением атмосферных мюонов высокой энергии, групп мюонов и т.д. и, по возможности, сохранить «монопольные» события. За 1003 суток чистого времени работы телескопа событий, удовлетворяющих критериям отбора магнитного монополя не обнаружено, что позволило установить ограничение на поток магнитных монополей: для  $v/c = 1$  предел на поток равен  $F_{\text{mon}} < 0.46 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ср}^{-1}$  [17].

## 2.5 Поиск астрофизических нейтрино высоких энергий

Центральной задачей для нейтринных телескопов в природных средах является поиск астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий. Неустранимым фоном при регистрации нейтрино от удаленных астрофизических источников являются нейтрино, генерируемые космическими лучами в атмосфере Земли. Здесь важно, что поток атмосферных нейтрино (рис. 3) довольно быстро падает с ростом энергии, поэтому при энергиях выше 0.1–1 ПэВ появляется возможность поиска и выделения нейтрино от астрофизических источников. В области высоких энергий трудности исследования фона связаны с отсутствием измеренных инклюзивных сечений рождения странных и очарованных адронов в нуклон-ядерных взаимодействиях при энергиях выше 10 ТэВ. При энергиях порядка 100 ТэВ ожидается, что основным источником атмосферных нейтрино, а следовательно фона для астрофизических нейтрино, будут распады тяжелых короткоживущих очарованных мезонов и барионов. Однако до сих пор не получено бесспорного эксперименталь-

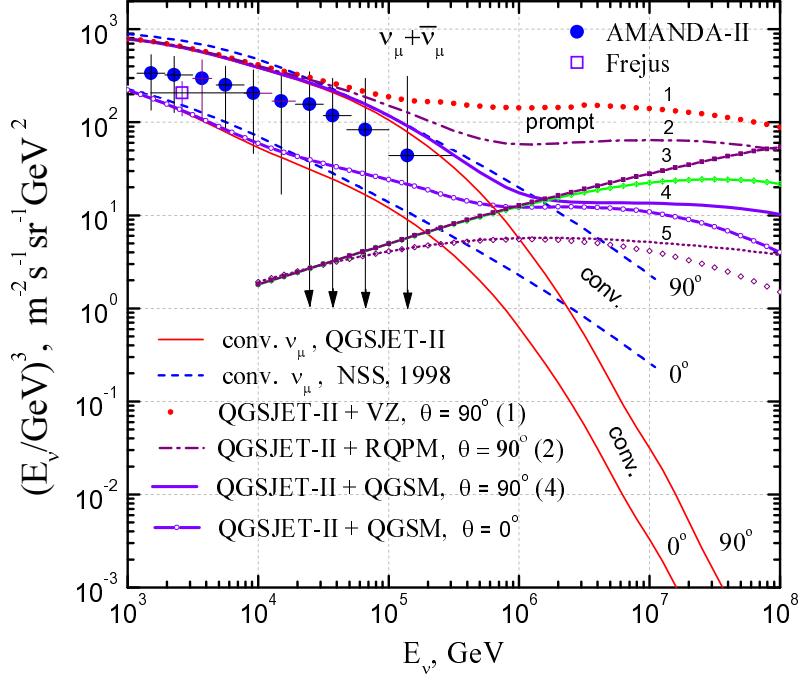


Рис. 3: Спектры атмосферных мюонных нейтрино высоких энергий. Символы – результаты измерений на установках Frejus и AMANDA-II. Расчет для зенитных углов  $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ : нейтрино от  $\pi$ ,  $K$ -распадов (conv.) – тонкие сплошные линии (спектр первичных космических лучей в модели Зацепина-Сокольской) и штриховые (расчет [18] со спектром Никольского); кривые с цифрами 1–5 – спектры нейтрино от распадов очарованных частиц (prompt) для нескольких моделей рождения чарма (см. [14]).

ного подтверждения существования «быстрых» (prompt) атмосферных мюонов и нейтрино. Состояние проблемы нейтринного фона иллюстрирует рис. 3. Здесь приведены результаты, полученные на установке AMANDA-II (ошибки измерений при высоких энергиях пока еще очень велики), и показаны для двух значений зенитного угла результаты расчета [14,18] энергетического спектра мюонных нейтрино от  $\pi$ ,  $K$ -распадов (conv.) и от распадов  $D$ ,  $\Lambda_c$ -частиц (prompt). Вклад последних получен с использованием нескольких моделей рождения чарма, приводящих к различию предсказаний потоков нейтрино в 10–20 раз. 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. Для степенного энергетического спектра нейтрино с показателем наклона, равным 2 ( $\phi_\nu \sim E_\nu^{-2}$ ),

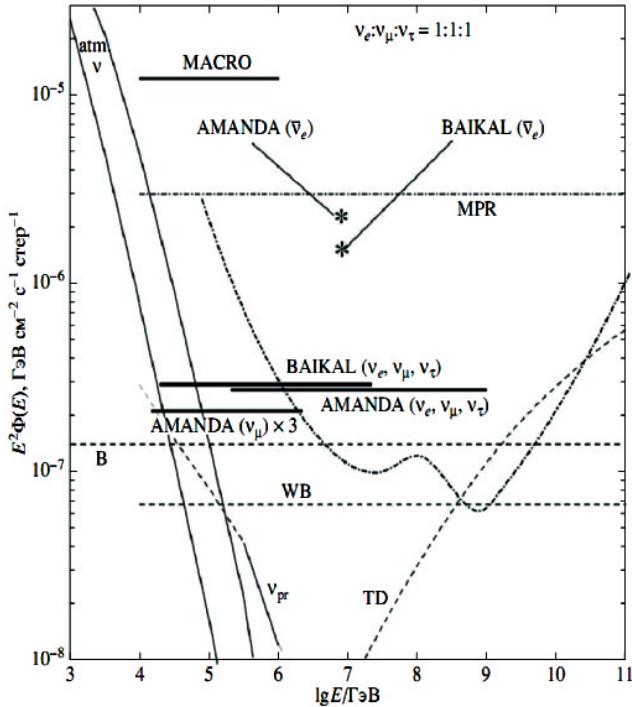


Рис. 4: Экспериментальные и теоретические ограничения на величину суммарных по всем типам нейтрино диффузных потоков для степенного спектра  $E_\nu^{-2}$ .

предсказываемом в ряде моделей ускорения космических лучей, и равном отношении потоков электронных, мюонных и тау-нейтрино, мы получили предел на диффузный поток астрофизических нейтрино всех сортов [19]:  $E_\nu^2 \phi_\nu < 2.9 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1} \text{ ГэВ}$ , для энергии  $20 \text{ ТэВ} < E_\nu < 20 \text{ ПэВ}$  (рис. 4).

### 3 Перспективы Байкальского нейтринного проекта

#### 3.1 Гигатонный водный детектор на озере Байкал

В последние годы начаты проектные работы и эксперименты, направленные на создание на оз. Байкал установки НТ1000 [10], которая будет состоять из 96 гирлянд длиной 350–460 м с 24 оптическими модулями на каждой гирлянде, общее число модулей – 2304. Все гирлянды будут сгруппированы в 12 кластеров. Расстояние между гирляндами будет около 60–80 м (рис. 5.).

Эффективный объем НТ1000 для регистрации каскадов с энергией  $E > 100$  ТэВ  $\sim 0.5$  км<sup>3</sup>, порог регистрации мюонов 10–100 ТэВ. Более точные параметры установки будут получены в результате моделирования с использованием метода Монте-Карло. Новый телескоп позволит осуществлять поиск нейтрино сверхвысоких энергий на уровне чувствительности к потокам, величина которых в несколько раз ниже предела Ваксмана–Бакалла (WB), более чем на порядок понизить предел на поток быстрых магнитных монополей или зарегистрировать их, решить другие задачи астрофизики и физики высоких энергий.

В НТ1000 будут использоваться фотодиодные умножители иного, чем в НТ200 типа, также по другому будет организованы все электронные системы установки, а также методы калибровки, синхронизации и определения пространственного положения оптических модулей. Для практической отработки новых подходов в 2008 году была развернута первая экспериментальная гирлянда установки НТ1000, которая была существенно модернизирована в 2009 году. Эта гирлянда включает в себя 12 оптических модулей на базе ФЭУ XP1807 (Photonis) and R8055 (Hamamatsu).

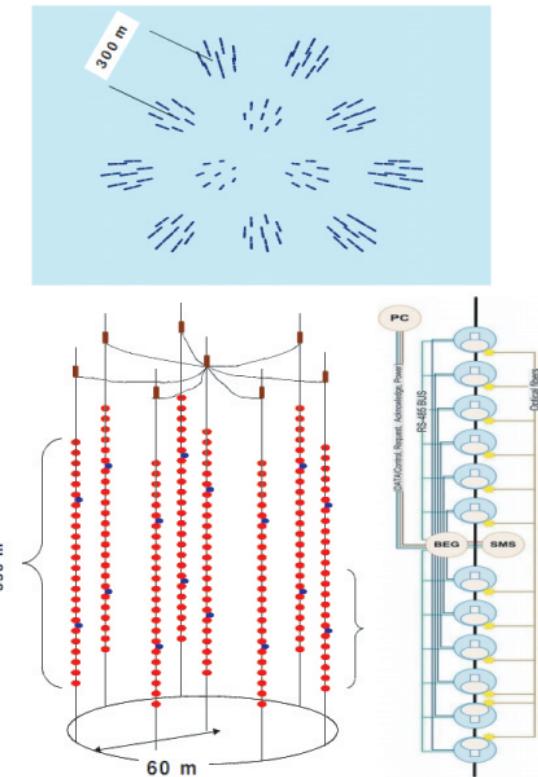


Рис. 5: Проектируемый Гигатонный Водный Детектор (ГВД). Верхняя панель – вид сверху: 12 кластеров (2304 оптических модуля) – вид сверху. В левом нижнем углу – кластер установки НТ1000 (аналог НТ200), в правом – экспериментальная гирлянда НТ1000.

### 3.2 Развитие методики акустической регистрации

Для регистрации нейтрино самых высоких энергий (больше 1000 ПэВ) нужны детекторы еще большего размера, чем IceCube и НТ1000, в тоже время трудно себе представить оптический детектор объемом существенно большим, чем кубический километр. В работах [20] показано, что при рождении ливней высоких энергий в воде должны возникать биполярные акустические импульсы длитель-

ностью несколько десятков микросекунд, что можно использовать для регистрации нейтрино высоких энергий в море или в озере Байкал. В условиях Байкала при энергии ливня  $10^{19}$  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, в принципе, иметь значительно больший эффективный объем при том же числе измерительных каналов, что и черенковская установка. Исследования с целью определения возможности акустической регистрации нейтрино сверхвысоких энергий на Байкале были начаты в 2000 году. За прошедшее время накоплен большой опыт измерений акустических сигналов, восстановления координат их источников и изучены основные особенности фона [21]. С учетом полученных знаний разработан и изготовлен 4-х канальный глубоководный цифровой прибор [22], который может рассматриваться как прототип элементарной ячейки будущего глубоководного акустического детектора нейтрино. Антenna 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. 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 году впервые осуществлена стационарная постановка прибора на глубине 100 м. Небольшая глубина постановки 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, оказалось, что при значительном фоне шумовых импульсов из верхней полусферы (шумы от волн, судоходства, подвижки и растрескивание льда и т.д.), а также под небольшими углами к горизонту из нижней полусферы (последние обусловлены рефракцией), был обнаружен пока только один биполярный импульс снизу (рис. 6).

## 4 Исследование динамических процессов в озере Байкал

В рамках Байкальского нейтрииного проекта появились принципиально новые возможности исследования динамических процессов в озере на основе технологий постановки со льда притопленных буйковых станций, в том числе, связанных

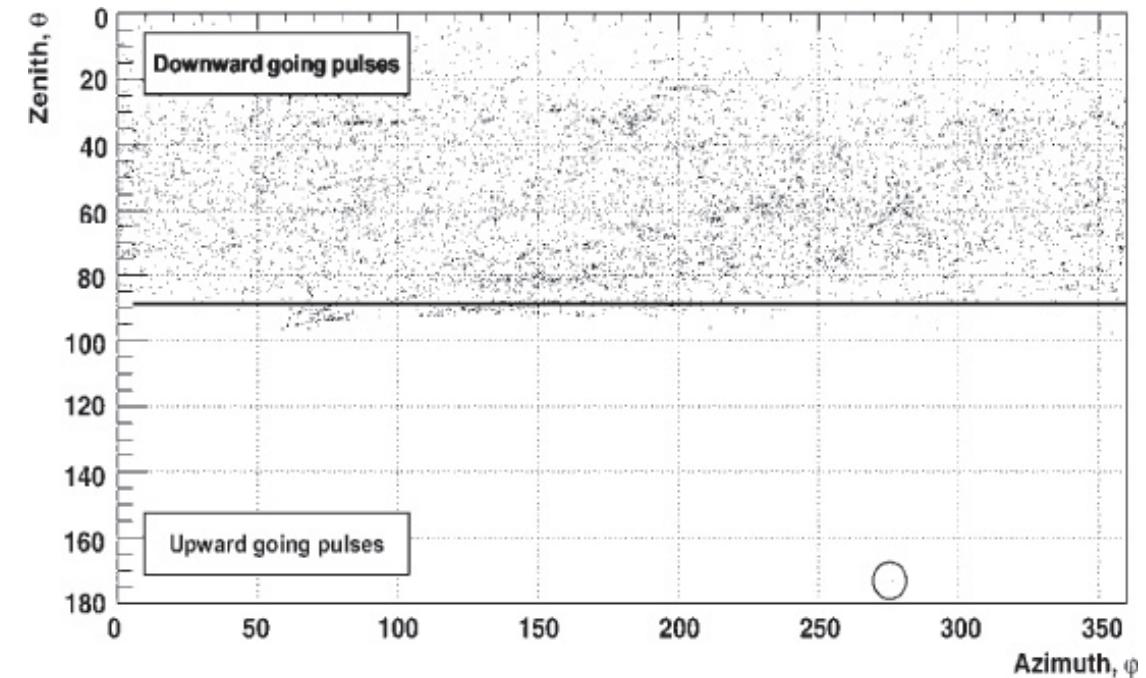


Рис. 6: Распределение по зенитному углу зарегистрированных биполярных импульсов

с береговым центром кабельными линиями связи, а также созданием высокочувствительных приборов и новых методов наблюдений. В результате проведенных исследований было открыто явление собственного свечения байкальской воды, изучена его природа, предложен метод использования свечения как инструмента для исследования гидрофизических процессов, детально изучены оптические свойства байкальской воды [23]. В сотрудничестве с EAWAG (Швейцария) и DESY-Zeuthen (Германия) с помощью распределенных на 3-х 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 прислоновое опускание вод инициированное процессами в атмосфере [24].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-02-00432-а, 09-02-10012-к, 07-02-00791, 07-02-00791, 08-02-00198, 09-02-10001-к, 09-02-00623-а, 09-02-12295), Федерального агентства по образованию (ГК 1242, проектов РНП. 2.2.1.1.7334, 2.2.1.1/1483, 2.1.1/1539, 2.2.1.1/5901, НОЦ «Байкал»), Федерального агентства по науке и инновациям (ГК № 02.740.11.0018), президентской программы «Ведущие научные школы РФ» (гранты НШ-321.2008-2, НШ-1027.2008-2).

---

## Литература

- [1] Cleveland B.T. et al. // ApJ 1998. V. 496. P. 505-529.
- [2] Koshiba M. // Phys. Rep. 1992. V. 200. No.5 & 6. P. 229-381.
- [3] McKeown R.D., Vogel P. // Phys. Rep. 2004. V. 394. P. 315-356.
- [4] Kajita T. // Prog. Phys. 2006. V. 69. P. 1607-1635.
- [5] Markov M.A. // Proc. 1960 Annual Int. Conf. on High Energy Phys., Rochester. 1960 P. 578.
- [6] Halzen F. // New Astron. Rev. 1998. V. 42. P. 289-299.
- [7] Ahrens J. et al. // Astropart. Phys. 2004. V. 20. P. 507; De Young T. // Mod. Phys. Lett. A. 2009. V. 24. 1543-1557; arXiv:0906.4530.
- [8] Belolaptikov I.A. et al. // Astropart. Phys. 1997. V. 7. P. 263.
- [9] Aynutdinov V.M. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A 2006. V. 567. P. 433-437.
- [10] Aynutdinov V.M. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A 2008. V. 588. P. 99-106.
- [11] Bagduev R.I. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 1999. V. 420. P. 138-154.
- [12] Айнуддинов В.М. и др. // Акустический журнал. 2005. Т. 55, № 6. С. 721-731.
- [13] Balkanov V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 298. P. 231-239.
- [14] Kochanov A.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. // Proc. 31st ICRC. Lodz, 7–15 July 2009. OG 2.5 0693; HE 2.1 0962; arXiv:0906.3791; arXiv:0906.0671.
- [15] Balkanov V. et al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 2001. V. B91. P. 438.
- [16] Avrorin A. et al. Proc. 31st ICRC, Lodz, 2009 (icrc1165); arXiv:0909.5589.
- [17] Antipin K. et al. // Astropart. Phys. 2008. V.29. P.366-372.
- [18] Naumov V.A., Sinegovskaya T.S., Sinegovsky S.I. // Nuovo Cim. A. 1998. V. 111. P. 129-148.
- [19] Aynutdinov V. et al. // Astropart. Phys. 2006. V. 25. P. 140-150.
- [20] Аскарьян Г.А., Долгошайн Б.А. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25, вып. 5. С. 232-233; Askarian G.A. et al. // Nucl. Instrum. Meth. 1979. V. 164, № 2. P. 267-278.

- [21] Айнутдинов В.М. и др. // Акустический журнал. 2006. Т. 52, № 5.
- [22] Aynutdinov V.M. et al. // Int. Journal Mod. Phys. A. 2006. V. 21. Suppl. 01. P. 202-206.
- [23] Безруков Л.Б. и др. // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34, № 1. С. 97-103.
- [24] Schmid M., Budnev N.M., Granin N.G. et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35.