

## АННОТАЦИЯ РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ

по государственному контракту № П 878 от 26 мая 2010 г  
по проблеме: «Создание пилотной стационарной гирлянды для поиска астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий акустическим методом и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал»

Исполнитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВПО «ИГУ») 664003, Иркутск, ул. К. Маркса, д.1.

Прошло 35 лет с момента, когда Г.А. Аскарьян с Б.А. Долгошеиным и независимо Дж.Лернд предложили идею метода акустической регистрации нейтрино высоких энергий в море или в озере Байкал. Существенным для акустического метода является то, что для частот в несколько килогерц и десятков килогерц длина поглощения звуковых волн на порядки величины больше, чем длина поглощения черенковского света в воде. Длина поглощения звука особенно велика в пресной воде, где, например, на частоте 10 кГц она по теоретическим оценкам должна превышать 200 км. Поэтому, в принципе, акустические сигналы могут регистрироваться с очень больших расстояний (несколько километров) с помощью более редкой по сравнению с черенковскими детекторами сети акустических приемников. Это особенно важно для создания установок для поиска нейтрино с энергиями больше  $10^{18}$  эВ и особенно с энергиями больше  $10^{20}$  эВ, когда объем мишени должен существенно превышать кубический километр. Однако, до сих пор в мире нет действующих акустических детекторов нейтрино. По-видимому, одна из главных причин этого в сложности выделения акустических сигналов от каскадных ливней и фона, создаваемого другими источниками.

В соответствии с заявленным планом и техническим заданием, опираясь на предложенные в ходе выполнения проекта модели, методы, алгоритмы, программные и аппаратные решения, создана и инсталлирована на озере Байкал пилотная стационарная гирлянда для поиска астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий акустическим методом и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал». В настоящее время проводятся штатные сеансы наблюдений с помощью этой установки, ведется практическая отработка методов измерений, обработки и анализа данных. По экспериментальным данным, получаемым с помощью пилотной стационарной гирлянды для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал возможно восстановить с точностью порядка 10 м местоположения глубоководных источников «нейтриноподобных» акустических сигналов, и определить, может ли данный источник рассматриваться как кандидат на нейтринное событие. Основным критерием такого отбора являются пространственно-временные характеристики звукового поля, регистрируемых сигналов.

На основе разработанных в рамках проекта моделей, методик и программ разработан оптимальный алгоритм поиска, распознавания и выделения нейтриноподобных событий, который позволил максимально увеличить эффективный объем наблюдения, с хорошей точностью восстанавливать местоположение квазилокальных источников звуковых сигналов, а в случае обнаружения сигналов от каскадных ливней энергию и направление прихода нейтрино. Важно, что разработанные в рамках проекта регистрирующие акустические модули, будучи глубоко под водой в озере Байкал, могут управляться в интерактивном режиме, в том числе по Интернет. Это позволяет корректировать программное обеспечение гирлянды в течение года испытаний, и открывает широкие возможности по отладке алгоритмов распознавания «нейтриноподобных» сигналов. Очередной вариант алгоритма может быть немедленно апробирован на установке в натуральных условиях.

Разработанные в рамках проекта способы подавления фона и увеличения отношения сигнал/шум на методическом, электронном и программном уровнях для поиска астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий акустическим методом позволяют понизить энергетический порог для регистрации нейтрино в холодном Байкале до величины сравнимой или даже меньшей, чем в теплом Средиземном море.

В ходе выполнения проекта разработаны следующие модели, методы, программы, алгоритмы и экспериментальные образцы приборов, позволяющие увеличить объем знаний для более глубокого понимания путей создания крупномасштабного акустического детектора астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий, способов их поиска:

- Проведен углубленный анализ экспериментальных данных о высокочастотных шумах в Байкале в качестве фона для акустической регистрации астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий, в том числе, на основе данных, полученных в ходе проекта с помощью 4-х канального глубоководного модуля предназначенного для исследования фоновых условий для поиска нейтрино сверхвысоких энергий акустическим методом на озере Байкал.

- На основе результатов численного моделирования и сравнительного анализа возможных подходов разработаны оптимальный алгоритм и методика поиска нейтринных событий акустическим методом на озере Байкал.

- Разработаны способы подавления фона и увеличения отношения сигнал/шум на методическом, электронном и программном уровнях для поиска астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий акустическим методом на озере Байкал;

- Разработано программное обеспечение для выделения в режиме "on-line" под водой событий – кандидатов на нейтринные события.

- Разработан способ определения величины энергетического порога для метода акустической регистрации астрофизических нейтрино в озере Байкал.

- Разработана методика восстановления местоположения источников «нейтриноподобных» акустических сигналов в озере Байкал с учетом реальных гидрофизических условий и эффектов рефракции.

- Разработаны методики абсолютной калибровки и измерения амплитудно-частотных и угловых характеристик гидрофонов и приемных трактов регистрирующих акустических модулей пилотной стационарной гирлянды в полевых условиях со льда озера Байкал. Проведены калибровочные измерения характеристик гидрофонов и электроники регистрирующих акустических модулей методом замещения в свободном поле в импульсном режиме на озере Байкал;

- Разработан проект пилотной стационарной гирлянды для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал;

- Разработаны, изготовлены и испытаны опытные экземпляры гидроакустических антенн на основе специализированных волноводных гидрофонов, приемных трактов и цифровой электроники регистрирующих акустических модулей пилотной стационарной гирлянды для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал. Разработано и отлажено их программное обеспечение.

- Разработаны структура, функциональная схема и алгоритм работы, программное обеспечение системы управления и передачи данных пилотной стационарной гирлянды, разработаны инфраструктура его обеспечения питания и передачи данных.

- Разработана методика, разработано и изготовлено электронное оборудование и программное обеспечение, необходимые для определения точного положения и ориентации под водой акустических антенн пилотной стационарной гирлянды для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал.

- Разработано программное обеспечение для организации обмена информацией между пилотной стационарной гирлянды для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал и береговым центром Байкальской нейтринной обсерватории, в том числе через Интернет.

- Разработано программное обеспечение для “off line” обработки экспериментальных данных, получаемых с помощью пилотной стационарной гирлянды, и анализа событий – кандидатов на нейтринные события при требуемой точности и достоверности восстановления энергии и направления прихода астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий.

- Изготовлена, отлажена, установлена на озере Байкал для постоянной работы и введена в режим штатной эксплуатации пилотная стационарная гирлянда для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал.

- Проведен сбор данных о гидроакустическом фоне для регистрации нейтрино в озере Байкал с помощью пилотной стационарной гирлянды для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий.

- Выполнена предварительная обработка и анализ данных, полученных с помощью пилотной стационарной гирлянды для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал.

Таким образом, все запланированные по 6 этапу и проекту в целом исследования выполнены полностью. Главным результатом является создание на основе разработанных в рамках проекта методов, алгоритмов, аппаратных и программных средств пилотной стационарной гирлянды в составе трех модулей акустических детекторов для поиска акустических сигналов от астрофизических нейтрино сверхвысоких энергий и исследования основных характеристик фона для их регистрации в озере Байкал. В апреле 2012 года гирлянда была смонтирована на одной из притопленных буйковых станций глубоководного комплекса Байкальского нейтринного телескопа для долговременной работы, успешно проведены тестовые сеансы наблюдений, в настоящее время установка введена в режим постоянных измерений. Ведется обработка и анализ, получаемых данных.

Полученные в ходе выполнения проекта результаты вселяют надежду в реальность создания в озере Байкал крупномасштабного акустического детектора нейтрино сверхвысоких энергий. Данный проект можно рассматривать как важный шаг на пути к такой установке. Замечательно, что эффективный объем акустического нейтринного телескопа (при том же количестве измерительных каналов) на Байкале может быть больше, чем в Средиземном море. Основные факторы здесь следующие. Как показали результаты наших исследований, интегральный фон в важной для акустической регистрации полосе частот 5-30 кГц в Байкале при благоприятных погодных условиях не превышает 2-5 мПа (такие условия наблюдаются не менее 50 процентов календарного времени). Этот уровень фона ниже, чем, например, в Средиземном море. Но что особенно важно, наверное, в глубинных слоях Байкала нет совсем или очень мало источников высокочастотных шумов. Поэтому, если акустические антенны размещать на относительно небольших глубинах, например, 100-500 м, использовать гидрофоны с ограниченной апертурой и «прослушивать» только глубинные слои, то можно получить исключительно благоприятные условия для акустической регистрации нейтрино. Это предположение подтверждается результатами наших измерений. Прибором, размещенным на стационарной буйковой станции на глубине порядка 150 м на фоне примерно 7000 зарегистрированных за время наблюдений «нейтриноподобных» импульсов, источники, которых расположены на небольших глубинах был зарегистрирован один такой импульс, направление на источник которого составило 6 градусов от направления вертикально вниз.

Значительная часть исследований по проекту была выполнена студентами, аспирантами и молодыми учеными Иркутского государственного университета. Возможность работать на уникальной физической установке УСУ-БГНТ под руководством ведущих ученых из ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, DESY и других организаций стала важнейшим стимулом повышения интереса к творческой деятельности и закрепления талантливой молодежи в науке, что является важнейшим результатом проекта.

Результаты, полученные при выполнении проекта, используются в следующих направлениях научно-педагогической работы:

- повышение качества обучения студентов специальностей «Физика» и «Радиофизика» по циклу физико-математических дисциплин с учетом последних достижений в области астрофизики, физики высоких энергий, техники детектирования слабых сигналов в условиях высокого фона, создания многопроцессорных информационно-измерительных систем, телекоммуникационных систем, гидроакустики, других направлений науки и техники;
- подготовка и модернизация учебных программ по следующим дисциплинам: «Акустические методы передачи информации и позиционирования подводных объектов», «Измерительно-вычислительные системы» «Экспериментальные методы исследований в астро и геофизике». «Цифровые методы обработки сигналов и изображений»;
- подготовка учебных пособий по тематике НИР проекта, предназначенных для студентов, аспирантов и молодых ученых;
- создание специализированных лабораторных практикумов для бакалавров и магистрантов: «Разработка элементов системы позиционирования подводных объектов», «ARM микропроцессоры», «Цифровые методы обработки сигналов», «Основы микропроцессорной техники» и др., на котором студенты имеют возможность работать с современным дорогостоящим оборудованием, знакомиться с методикой проведения измерений, обработки и анализа данных;
- выполнение курсовых и дипломных работ, организация производственной практики.

Руководитель проекта

Л.В.Паньков