

УДК 681.883+551.48.03

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОВЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРИНО СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

Н.М. Буднев, А.А. Кочанов, Р.Р. Миргазов, А.А. Павлов,
Г.Л. Паньков, Л.В. Паньков

THE RESEARCH OF BACKGROUND FOR ACOUSTIC DETECTION OF HIGH-ENERGY NEUTRINO IN THE LAKE BAIKAL

N.M. Budnev, A.A. Kochanov, R.R. Mirgazov, A.A. Pavlov, G.L. Pankov, L.V. Pankov

Регистрация акустических сигналов от каскадных ливней, порождаемых нейтрино сверхвысоких энергий в воде, может стать важным инструментом изучения Вселенной. В работе приведены первые результаты изучения высокочастотных шумов озера Байкал как фона для акустической регистрации нейтрино.

The acoustic detection of the cascade showers produced by the super high energy neutrino is very perspective way for study of the Universe. First results of the study of a high frequency acoustic noise in the Lake Baikal are presented.

Введение

Идея акустической регистрации нейтрино сверхвысоких энергий восходит к работе Г.А. Аскарьяна 1957 г. [1]. Потенциальные возможности метода связаны с тем, что поглощение акустических волн в воде значительно меньше, чем поглощение черенковского излучения. Второе обстоятельство, которое благоприятствует возможности регистрации акустических сигналов на расстоянии в сотни метров и даже несколько километров от каскадных ливней, состоит в том, что амплитуда импульсов от ливней в ближней зоне уменьшается только как корень из расстояния, а в дальней – обратно пропорционально расстоянию от ливня. В данной работе представлены результаты измерений высокочастотных шумов, выполненных в течение зимних экспедиций в марте – апреле 2003 и 2004 гг. на Южном Байкале в районе, где расположен Байкальский нейтринный телескоп НТ200+ [2]; в июне 2003 г. в нескольких точках в Южном и Среднем Байкале с борта НИС «Г.Ю. Верещагин» и «Титов», принадлежащего ЛИН СО РАН; в августе 2004 г. в окрестности расположения НТ200+ с борта катера.

Аппаратура

Блок-схема прибора, разработанного для измерения высокочастотных шумов, представлена на рис. 1. Измерительная система прибора изготовлена на базе флэш-микроконтроллера (MCU) MSP430F149 фирмы Texas Instruments, в состав которого входит 12-разрядный АЦП с максимальной частотой преобразования 200 кГц. Пьезокерамические сферические гидрофоны диаметром 50 мм имеют чувствительность порядка 200 мкВ/Па. Коэффициент усиления предварительных усилителей равен 78 дБ (в 2004 г. 80 дБ). Для подавления низкочастотных гидроакустических шумов усилители имеют частотную коррекцию с ослаблением около 20 дБ на октаву в области частот до 1 кГц. Для хранения информация записывается на внутреннюю память. В 2003 г. использовался накопитель на жестком магнитном диске типа МНМ2100АТ емкостью 10 Гб фирмы Fujitsu, который был в 2004 г. заменен на флэш-карту емкостью 1 Гб. Для временной привязки данных используются часы. Питание привода жесткого диска и цифровой

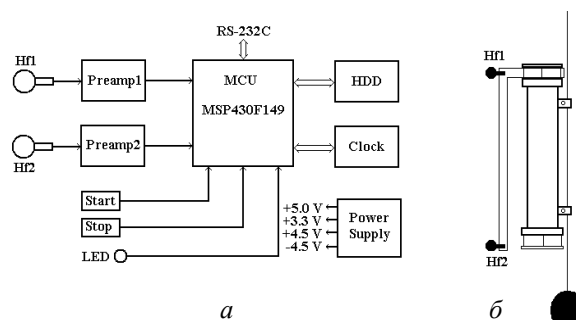


Рис. 1. Блок-схема автономной подводной гидроакустической измерительной системы – а и схема крепления гидрофонов и модуля – б. Обозначено: Hf1, Hf2 – измерительные преобразователи 1П2Г; Preamp1, Preamp2 – предварительные усилители с ФНЧ; MCU – микроконтроллер; HDD – накопитель на жестком магнитном диске; Clock – часы; Power Supply – блок батарей питания; Start, Stop – магнитоуправляемые контакты; LED – контрольный светодиод.

части измерительной системы осуществлялось от батареи никель-кадмиевых аккумуляторов емкостью 4.5 А·ч. Питание аналоговой части измерительной системы осуществлялось от щелочных батарей PROCELL. Интерфейс для жесткого диска был организован в виде подпрограммы, записанной в память микроконтроллера. Предварительная настройка режима работы измерительной системы производится с помощью персонального компьютера через последовательный интерфейс (RS-232C) с помощью загрузочной программы, определяющей продолжительность временных интервалов, в течение которых будет вестись запись результатов измерений и промежутков между ними.

Электроника прибора находится внутри цилиндрического глубоководного корпуса из алюминий-магниевого сплава АМг-6 с наружным диаметром 170 мм.

Глубинная зависимость

Самым мощным источником акустического шума на Байкале является лед, точнее треск льда, возникающий при изменении его температуры и под действием других факторов. Средняя величина звукового давления в полосе частот 1–50 кГц в период, когда озеро покрыто льдом, составляет 0.1–0.2 Па,

что в несколько раз больше, чем соответствующая величина во время, когда льда на Байкале нет. Более того, только в нескольких измерениях интегральный уровень высокочастотного шума в отсутствие льда был больше 0.1 Па, в то время как зимой он достигал величины в 1 Па. Зимой, как правило, наблюдаются значительные суточные вариации уровня шума, но иногда в тихие пасмурные дни минимальный уровень шума находится на уровне и даже ниже минимальных шумов летом и не превышает 10 мПа. Интегральный уровень природных шумов в Байкале слабо зависит от глубины (рис. 2). Однако, как и в океане [8], с ростом глубины увеличивается анизотропия шумового поля, т.е. дифференциальная по зенитному углу плотность мощности шумов вытягивается в направлении зенита.

Спектральные характеристики акустических шумов

Спектральная плотность мощности шумов при стабильных условиях, как правило, на всех глубинах практически равномерно уменьшается на 5–6 дБ с ростом частоты на октаву в частотном диапазоне 1–50 кГц. Во время шторма, дождя, сильных подвижек льда спектр шумов становится нестационарным и неравномерным, иногда с более или менее широкими пиками в некоторых частотных диапазонах. В одном из измерений, проведенном 05.04.03 г. в Южном Байкале на расстоянии 600 м от Байкальского нейтринного телескопа НТ-200, наблюдалось устойчивое повышение спектральной плотности шума в

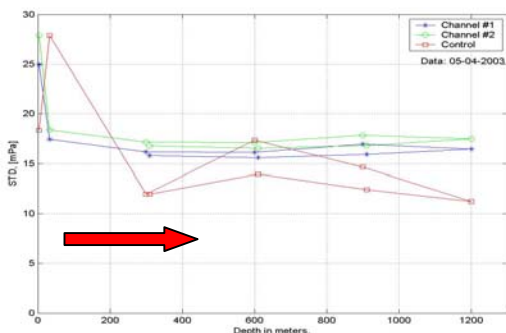


Рис. 2. Зависимость эффективного значения флуктуаций интегрального шумового акустического поля от глубины для сеанса 05.04.2003 г.

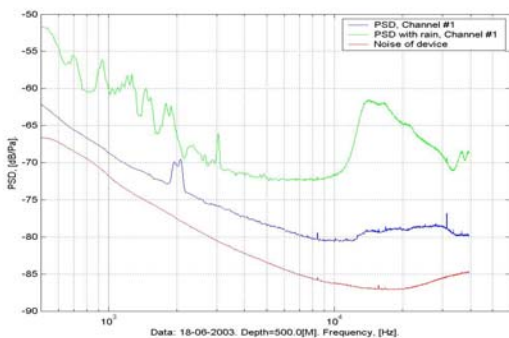


Рис. 3. Характер изменения СПМ акустических шумов в эксперименте 18.06.2003 г. для глубины 500 м при увеличившейся интенсивности дождя.

килогерцовой области. Одним из источников дополнительного шума мог быть выход газов из дна озера (такие явления на Байкале наблюдаются часто).

Годовой ход шума

Представление о диапазоне изменения интегрального уровня шумов в течение года можно получить из рис. 4, где представлена годовая зависимость сглаженных гидроакустических шумов на глубине 1380 м. Эти измерения были выполнены в рамках гранта INTAS Ref. No :01-2309.

На рис. 4 показаны отсчеты, усредненные за 8 с и пропорциональные эффективному значению гидроакустического шума. Видно, что размах изменения уровня усредненных шумов в течение года достигает 77 дБ. Для мгновенных значений размах изменения уровня шумов может превышать 100 дБ.

Импульсные характеристики шумов

Фоном для акустической регистрации ливней высоких энергий в первую очередь являются импульсные шумы малой длительности. На Рис. 5, а, б, с представлены результаты статистического анализа данных, полученных при измерениях, проведенных в тихую погоду в августе 2004 г., т.е. в наиболее благоприятных условиях для регистрации слабых сигналов. Прибор находился на глубине 250 м. Первым шагом такого анализа было исключение части данных, в которых присутствовали шумы большой амплитуды, выходящие за пределы динамического диапазона амплитудно-цифрового преобразователя. Далее были исключены электронные наводки и сбои, проявляющиеся как выбросы в обоих каналах одновременно или со сдвигом на один шаг квантования по времени. На рис. 5, а приведено распределение коротких (длительностью несколько десятков микросекунд) акустических импульсов по числу переходов знака амплитуды акустического давления через ноль. Из этой гистограммы видно, что преобладают однополярные скачки давления. Количество биполярных импульсов, которые могут генерироваться каскадными ливнями, на порядок меньше, чем однополярных. На рис. 5, б приведено распределение биполярных импульсов по амплитуде в единицах средних квадратичных отклонений (СКО), а на рис. 5, в – по длительности.

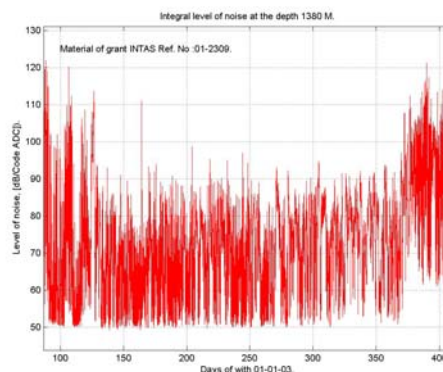


Рис. 4. Изменение интегрального уровня шума на глубине 1380 м. Выборки взяты с интервалом 10 с и сглажены на 8 с интервале.

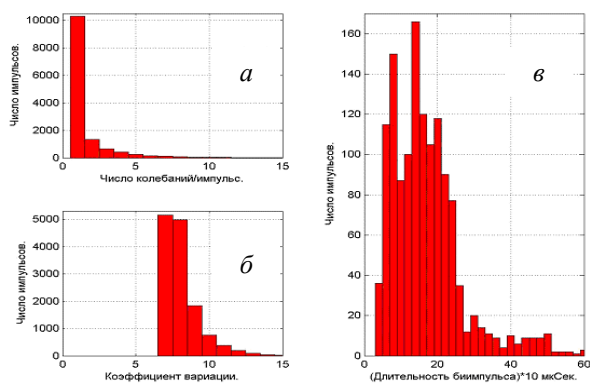


Рис. 5. *a* – распределение коротких (длительностью несколько десятков микросекунд) акустических импульсов по числу переходов знака амплитуды акустического давления через ноль; *б* – распределение биполярных импульсов по амплитуде в единицах средних квадратичных отклонений (СКО); *в* – распределение биполярных импульсов по длительности.

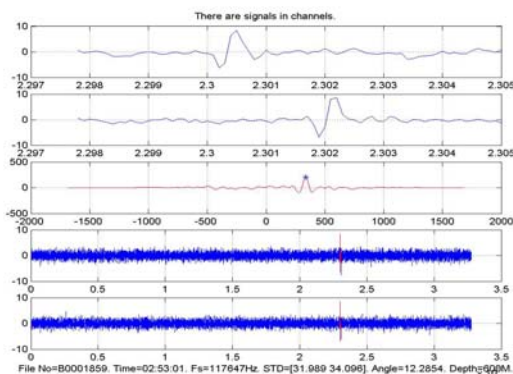


Рис. 6. Пример короткого акустического импульса.

Однако корреляционный анализ сигналов с двух гидрофонов показал, что подавляющая часть всплесков акустического давления, проявившихся как короткие биполярные импульсы, не могут интерпретироваться как сигналы от квазилокального источника, а возникают вследствие интерференции акустических волн. Тем не менее, в имеющемся банке данных было найдено несколько событий, в которых сигналы с двух гидрофонов имеют очень высокую степень корреляции, по амплитуде превышают 3 СКО для данного фрагмента данных и имеют форму, близкую к ожидаемой от каскадных ливней.

Такой пример приведен на рис. 6. На двух нижних графиках этого рисунка приведена запись реализации шума в двух каналах прибора. На двух верхних – растянутые фрагменты нижних графиков, выделенные программой-селектором. По оси абсцисс отложены номера отсчетов в реализации (интервал дискретизации процесса равен 8.5 мкс), по оси ординат – относительная амплитуда в единицах

СКО. На среднем графике показана взаимно ковариационная функция для верхних фрагментов. Здесь цена деления по оси абсцисс составляет 0.05 от интервала дискретизации по времени, поскольку использовалась сплайн-интерполяция для уменьшения погрешности оценки относительной задержки сигналов. Измерения были выполнены 01.04.03 г. со льда на глубине 600 м. Наличие двух каналов регистрации, разнесенных по глубине, позволило, получить оценку зенитного угла – 77.7° для направления волнового вектора данного импульса. Фактическое направление на источник звука зависит от расстояния до него и рефракции, которая определяется профилем скорости звука.

Заключение

Представленные здесь первые результаты исследования высокочастотных шумов озера Байкал свидетельствуют о достаточно сложной картине формирования шумового поля и большом разнообразии источников звука. Ряд общих свойств шумов, таких как слабая глубинная зависимость, наклон спектральной плотности мощности шумов, подобны наблюдаемым в океане [3, 4]. В шумах представлено значительное число коротких всплесков, большинство из которых, вероятно, есть результат интерференции акустических волн, но некоторые редкие импульсы весьма похожи на ожидаемые от каскадных ливней, и их трудно объяснить интерференцией.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ, Федерального агентства по образованию РФ, Министерства науки и образования Германии, Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 02-02-17427, 03-02-310011, 04-02-31003, 04-02-31006, 05-02-16593), Программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 4006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аскарьян Г.А. Гидродинамическое излучение от треков ионизирующих частиц в стабильных жидкостях // Атомная энергия. 1957. Т. 3, № 8. С. 152–153.
2. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980.
3. Ainutdinov V. et al. The Baikal neutrino project: status, results and perspectives // Nucl. Phys. B. 2005. V. 143. P. 335–342.
4. Фурдуев А.В. Шумы моря // Акустика океана. М.: Наука, 1974. С. 619.
5. Vandenbroucke J., Gatta G., Lihtinen N. Experimental study of acoustic ultra-high energy neutrino detection // astro-ph/0406105 v1.