

УДК 534:539.1

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ АКУСТИКИ**В.Б. Бычков**

ФГУП «ВНИИФТРИ»

Введение

Изучение акустических явлений, возникающих при взаимодействии проникающего излучения с веществом, составляет предмет радиационной акустики [1,2]. Это направление в акустике не столь уж и молодо – начало оно берет в 1880-81 годах, когда два великих ученых, Александр Белл и Вильгельм Рентген, один за другим опубликовали статьи с описанием оптико-акустического эффекта [3]. Наблюдая пульсации давления в замкнутом объеме газа при облучении его модулированным потоком инфракрасного излучения, А. Белл высказал мнение, что радиационное возбуждение звука «есть общее свойство всех веществ» (цит. по [1]). На возбуждение звука в водной среде заряженными частицами было впервые указано в 50-е годы советским физиком Гурgenом Аскарьяном [4,5]. Тогда же им была предложена идея акустического детектирования заряженных частиц, которая впоследствии трансформировалась в метод глубоководного детектирования космических нейтрино [6-8] в естественных водных бассейнах (см. рис. 1).

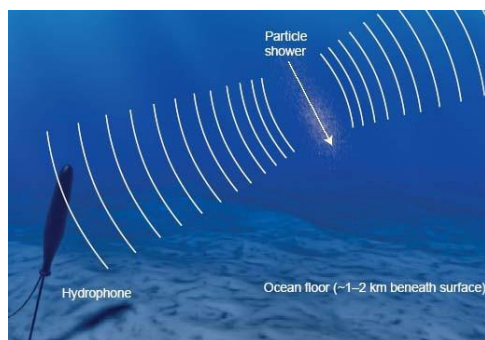


Рис. 1. Высокоэнергетическое нейтрино может вызвать мощный электромагнитный ливень в толще океана; порожденный им акустический импульс регистрируют гидрофоны (изображение с сайта «saund.stanford.edu»)

Гидроакустический способ регистрации каскадов, вызванных космическими частицами, имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционным оптическим. К ним относятся слабое (по сравнению с поглощением света) поглощение звука в воде, большая надежность гидроакустической аппаратуры и лучшая помехоустойчивость, связанная с

тем, что скорость звука гораздо меньше скорости света. Поэтому акустический метод рассматривался как один из основных в грандиозном проекте DUMAND [2, гл. 11], предполагавшем создание в глубоководном океане нейтринного телескопа на базе пространственной решетки гидрофонов объемом порядка 100 км^3 .

Идея проекта DUMAND вызвала к жизни в 70- 80-е гг. постановку ряда модельных экспериментов, выполненных в ускорительных лабораториях СССР и США на выведенных протонных [9-12] и электронных [2, с.252; 13] пучках. В этих работах были получены результаты, дающие представление о характере генерируемых пучками гидроакустических сигналов. Однако согласия как между экспериментом и теорией, так и между выводами различных исследователей не наблюдалось. В наиболее цитируемой статье Л. Сулака и др. [9], например, приводились два типа наблюдавшихся акустических импульсов, причем форма сигналов в обоих случаях не соответствовала теоретической. Авторы работ [8,9] высказывали мнение об основополагающем вкладе теплового механизма в создание звука ионизирующим излучением. В работах же [10,12] отмечался значительный вклад других механизмов. В экспериментах по определению температурной зависимости амплитуда генерируемого пучком в воде акустического сигнала обращалась в ноль не при 4°C , как того требует терморadiационная теория, а при температуре около 6°C [11] и $5,1^\circ\text{C}$ [13]. По данным работы [10], полярность импульса изменялась при 6°C при измерении в широкой (до 80 кГц) полосе частот, но при снижении верхней границы частотного диапазона до 40 кГц сигнал обращался в ноль при 4°C ; авторы объясняли такое отклонение вкладом нетерморadiационных механизмов, в частности, микроэлектрострикцией в среде, проявляющейся при минимальных значениях коэффициента объемного теплового расширения.

В целом, теоретически и экспериментально было установлено, что интенсивный поток ионизирующего излучения создает в воде протяженный источник акустического поля квазицилиндрической формы, параметры которого связаны с распределением в среде теплового поля, в которое преобразуется энергия потока частиц. Следуя работам [2,9], будем называть этот источник термоакустической антенной (ТА).

Развитие проекта DUMAND (как и многих других крупных советско-американских научных проектов) было прервано перестройкой в СССР, после которой у нашей страны уже не осталось средств на его осуществление. У американцев же пропал основной стимул, заключавшийся в том, чтобы отвлечь силы ученых и возможности промышленности в СССР от оборонной тематики. Поэтому работы 90-х годов были в основном теоретическими, наиболее активно они велись в Институте ядерных

исследований – Л.Г. Деденко, И.М. Железных и др. [14]. Однако в начале 2000-х годов интерес к акустическим методам детектирования нейтрино существенно возрос [15,16]. В ряде международных проектов по глубоководной регистрации нейтрино, таких как ACORN [16], SAUND [17], ANTARES и входящий в него AMADEUS [18], БАЙКАЛ [19], NEMO [20], САДКО [21], используются гидроакустические приемные тракты.

Целесообразность развития методов радиационной гидроакустики проявилась еще, как минимум, в двух направлениях. Первое из них связано с возможностью внешнего, дистанционного контроля процессов в пространственной области взаимодействия излучения со средой. Второе – создание альтернативных методов измерения параметров пучков. Это важно, например, в связи с продолжающимся использованием в медицине методов лечения опухолей, внедренных в 80-е гг. на базе ускорительной лаборатории ИТЭФ и связанных с воздействием протонных пучков непосредственно на область формирования опухоли. Измерения и анализ акустических сигналов позволяют в этих случаях получить информацию о ходе лечебной процедуры и о количестве поглощенной тканью энергии проникающего излучения.

В этих обстоятельствах в 1999-2000 гг., по приглашению коллег из ИТЭФ, одного из крупнейших мировых центров физики частиц высоких энергий, к исследованиям подключились ученые ВНИИФТРИ, располагающие оригинальными методами и средствами измерения параметров акустических сигналов в водной среде. Первоначально в работе приняли участие несколько сотрудников института (В.И. Албул, В.Б. Бычков, А.Ф. Курчанов, Б.В. Иванов). Инициатором был Владимир Иванович Албул, ранее, до прихода в гидроакустику, занимавшийся измерениями ионизирующих излучений. Первые полученные результаты [22,23] и положительная, можно даже сказать, радостная реакция на них коллег-ядерщиков повысили интерес к проблеме, что позволило в дальнейшем привлечь в коллектив других наших сотрудников (С.С. Васильева, А.В. Кистовича, Н.К. Краснова, В.П. Масляного). Успешному продолжению работ способствовало получение коллективом гранта РФФИ на 2002-2004 гг.

Ниже излагаются результаты теоретических и экспериментальных изысканий, выполненных в 2000-2010 гг. группой, включавшей перечисленных ученых нашего института, объединившихся в решении сложных задач радиационной гидроакустики с коллегами из ИТЭФ (лаборатория В.С. Демидова) и с 2005 года МГУ (кафедра общей ядерной физики, руководимая Б.С. Ишхановым).

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ АНТЕННЫ**Немного теории**

Теоретическое рассмотрение задачи терморadiационного возбуждения звука пучком высокоэнергетических частиц было проведено Анатолием Васильевичем Кистовичем. Им было получено [24] новое асимптотическое решение - оригинальная квадратурная формула, позволяющая определять распределение звукового давления от терморadiационного источника в пространстве и во времени. В качестве основного подхода при решении задачи о терморadiационном возбуждении звука, которая в своей постановке относится к типу некорректно поставленных задач математической физики, им было впервые применено построение псевдофункции Грина системы термогидродинамических уравнений с тепловыми источниками в приближении Буссинеска и представление асимптотического решения в виде разложения по собственным функциям типа N-волн. Справедливость заложенных моделей и результатов, полученных при использовании данного оригинального подхода, проверялась в предельном случае полубесконечной области торможения с однородной продольной интенсивностью давления возбуждения. Это позволило определить адекватный вариант физической модели процесса, который обеспечивал точное совпадение с известными результатами в данном предельном случае. Полученное асимптотическое решение определяет пространственно-временную изменчивость поля звукового давления, порождаемого в жидкой среде эффектом торможения в ней высокоэнергетических частиц. Отличительной особенностью полученного результата является направленность терморadiационного источника звука; основной максимум формируемой им диаграммы направленности расположен в плоскости, нормальной оси цилиндрической области возбуждения.

Физическая суть терморadiационной модели состоит в следующем. Высокоэнергетическая частица или пучок ускоренных ионизирующих частиц, осесимметричный вдоль направления своего распространения, попадая в исходно однородную безграничную равновесную жидкость, практически мгновенно создает в ограниченной области пространства зону разогрева. Поскольку жидкость обладает способностью изменять объем при нагревании, в зоне разогрева создается область быстрого изменения давления, порождающая в среде акустические процессы типа N-волны. В результате описанного воздействия в исходно покоящейся жидкости появляются возмущения полей давления, плотности и температуры. Интенсивность возмущений пропорциональна удельной плотности потерь энергии пучком частиц, которая для электронного пучка постоянна на всем

пути торможения, а для протонного пучка имеет заметный максимум так называемый пик Брэгга в конце пробега. Дважды дифференциальное распределение средних потерь энергии протонами в воде, полученное с помощью математического моделирования в лаборатории В.С. Демидова, представлено на рис. 2.

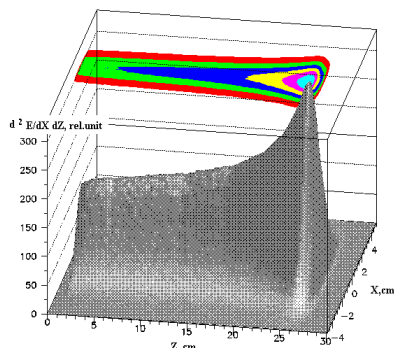


Рис. 2. Дважды дифференциальное распределение средних потерь энергии протонами в воде, полученное в результате моделирования. Протоны распространяются вдоль оси Z, ось X направлена в горизонтальной плоскости, проходящей через центр пучка. Энергия пучка 200 МэВ. В верхней части рисунка - контуры двумерного распределения потерь, построенные на уровнях 0.85, 0.7, 0.56, 0.42, 0.28, 0.14 от максимума

Моделирование было выполнено по программе GEANT-3.21 [25], которая является инструментом описания экспериментальных установок и моделирования всех известных физических процессов, происходящих при прохождении микрочастиц в среде. Первоначальная энергия протонов равна 200 МэВ. В верхней части рисунка (взятого из статьи [26]), контурами изображены проекции двумерного распределения потерь на уровнях 0.85, 0.7, 0.56, 0.42, 0.28, 0.14 от максимума. Аналогичную пространственную форму имеет и распределение интенсивности в «раскрыве» ТА, возникающей в момент прохождения пучка и создающей акустическое поле в окружающей водной среде. Благодаря кратковременности процесса сжатия-расширения, излучение ТА имеет достаточную когерентность для формирования описанной выше диаграммы направленности.

Эксперименты на выведенных протонных пучках

Исследование параметров гидроакустического поля ТА проводилось в 2001-2005 гг. группой ученых ВНИИФТРИ и ИТЭФ на медицинском пучке протонов ускорителя ИТЭФ. Подготовкой ускорителя и работами на нем руководил Виктор Егорович Лукьяшин. Пучок имел следующие параметры: энергия – 200 МэВ, длительность импульса пучка – 70 нс, пространственная

форма пучка в поперечном направлении была близка к распределению Гаусса, диаметр пучка – 2 см (ширина на полувысоте). Интенсивность пучка поддерживалась постоянной около $4 \cdot 10^{10}$ протонов в импульсе и контролировалась индукционным датчиком. В качестве мишени, в которой происходило торможение пучка протонов, служила соленая вода, заполняющая бассейн размерами $50.8 \times 52.3 \times 94.5$ см, выполненный из оргстекла, армированного и герметизированного на стыках граней.

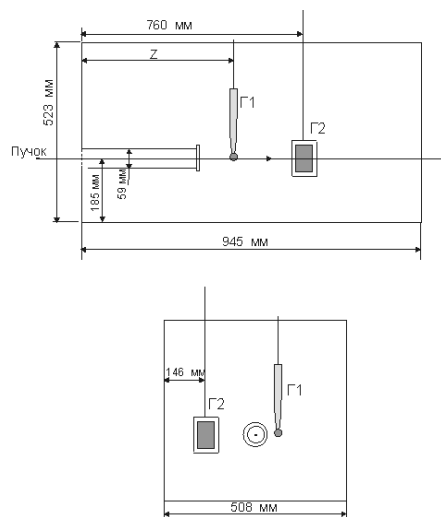


Рис. 3. Схема расположения гидрофонов в водной мишени

Вода заполняла сосуд на 90% его объема, концентрация соли составляла около 3%, температура воды была равна 13.5°C . Размеры и конструкция мишени позволяли исключить при измерениях отражение от границ и получить подробную структуру гидроакустического поля протонного пучка. Ввод пучка протонов в центр измерительного объема производился через трубу диаметром 59 мм, длиной 46 см и толщиной стенки 1.5 мм, вставляемую в боковую грань бассейна и закрытую заглушкой из тефлона толщиной 2 мм. Средний пробег протонов в воде составлял 25.2 см. Измерения проводились с помощью двух гидрофонов типа ГИ-14 с диаметром преобразователя 4 мм и высотой 6 мм, разработанных и изготовленных во ВНИИФТРИ. Применявшиеся гидрофоны обладали высокой чувствительностью первичного преобразователя, практически постоянной – около 220 мкВ/Па , в диапазоне $3 \dots 100 \text{ кГц}$, что позволяло без искажений зарегистрировать акустический импульс, возбуждаемый тормозившимся в воде пучком протонов. Уровень

сигнала в экспериментах превышал уровень собственных шумов гидрофонов не менее, чем на 12-15 дБ. Один из гидрофонов, опорный Г2, был закреплен неподвижно, положение другого, предметного Г1, менялось в течение эксперимента (см. рис. 3). Перемещение гидрофона Г1 осуществлялось с помощью оригинального электромеханического сканера (разработанного и собственноручно изготовленного В.И. Албулом), позволяющего устанавливать гидрофон дискретно с шагом 4.5/8.9 мм в пределах линейной апертуры длиной 0.4 м.

Отличительной способностью сканера была возможность управления перемещением гидрофона из аппаратного зала, что позволило исключить посещения радиационной зоны во время работы с пучком. Именно это его свойство обеспечило реализацию многоточечной апертуры и, в конечном счете, получение подробной пространственной структуры поля ГА. Позднее появилось название – метод сканирующего приемника (гидрофона).

Сигналы от гидрофонов и с индукционного датчика интенсивности пучка считывались в стандартный компьютер IBM PC с помощью специально сконструированной платы. Аналоговая часть платы ввода позволяет вести одновременную оцифровку до четырех аналоговых сигналов с максимальной частотой выборки при обработке сигналов в каждом канале 400 кГц. Считывание информации производилось по сигналу, поступающему на синхронизирующий вход платы одновременно с приходом пучка на мишень. Для данной платы было разработано системное программное обеспечение, позволяющее одновременный ввод, отображение и запись сигналов со всех каналов, при возможности синхронизации по любому из них. Был также разработан комплект прикладного программного обеспечения обработки сигналов, который позволяет получить амплитудно-фазовые зависимости сигналов, узкополосный спектр, третьоктавный спектр, трехмерное отображение пространственных и временных зависимостей и другие характеристики сигнала. Программное обеспечение было создано Сергеем Сергеевичем Васильевым. Аналоговые электронные устройства подготовили Анатолий Федорович Курчанов и Борис Викторович Иванов, в последующем этим занимались также Николай Константинович Краснов и Виталий Петрович Масляный.

Опишем результаты трех экспериментов [26-28]. Первый из них [28] выполнялся при сканировании гидрофоном Г1 в горизонтальной плоскости, проходящей через ось пучка протонов, по линейным трассам, отстоящим на трех расстояниях от центра пучка - 3, 6 и 13.5 см (соответственно – серии измерений 01,02,03). Координата ZГ1 (вдоль пучка) изменялась от точки входа пучка в воду до 36 см. Время реализации при каждом положении подвижного гидрофона составляло 250 мкс (1000 отсчетов по 0.25 мкс).

Математическая обработка производилась на описанной выше аппаратуре и включала частотную фильтрацию, амплитудный анализ и анализ формы сигнала, построение усредненных выборок данных по произвольным координатным направлениям и получение трехмерных изображений.

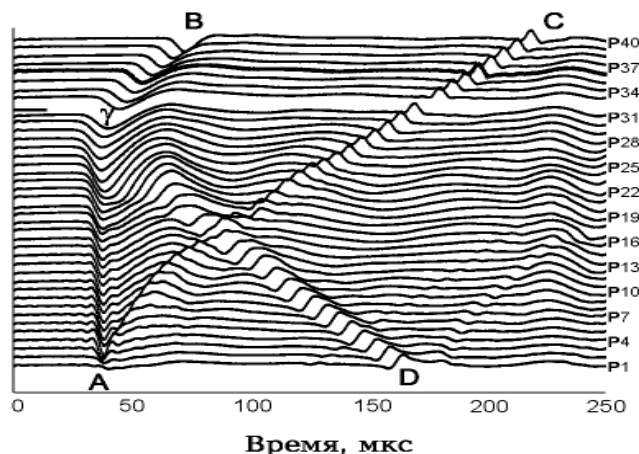


Рис. 4. Пространственно-временная структура акустического поля, создаваемого в воде пучком протонов с энергией 200 МэВ

На рис. 4 представлена в трехмерном виде пространственно-временная структура гидроакустического поля, введенного в водную мишень протонного пучка (для примера иллюстрируется результат серии 02). По оси абсцисс отложена временная развертка t считывающего устройства, по оси ординат - ЗГ1 в единицах шага сканирующего устройства (p1-p40), по оси аппликат – в относительных величинах напряжение на выходе гидрофона Г1. Для лучшей воспринимаемости структуры поля сигнал представлен в инвертированном виде. Видна динамика изменения отклика гидрофона. Можно разделить вклады от трех когерентных источников. В виде протяженной впадины в направлении А-В наблюдается акустический сигнал от ближайшей точки излучающей акустической антенны (первый источник). Продольный размер антенны соответствует пробегу протонов в воде. На рисунке буквой γ обозначена область окончания пучка и, соответственно, акустической антенны. На начальном участке (до области γ) впадина проходит параллельно оси ординат, т.к. гидрофон движется параллельно антенне и время распространения сигнала до гидрофона остается постоянным. На этом участке регистрируется цилиндрическая волна, расходящаяся, в соответствии с теорией [6], от антенны. Далее

гидрофон, продолжая двигаться по прямой, удаляется от антенны, время прихода сигнала увеличивается, и впадина на участке γ -В изменяет свое направление. Отметим, что основная энергия акустического сигнала от этого источника проявляется как волна сжатия.

Другим источником, сигнал от которого представлен на рисунке в виде гребня DB, является область так называемого пика Брэгга (в конце пробега протонов), где, согласно рис. 2, резко возрастает плотность выделения энергии. Когда гидрофон расположен в начале антенны, вблизи точки входа пучка в воду (зарегистрированная в этом случае осциллограмма обозначена на рис. 4 как p1), область пика Брэгга находится от гидрофона на расстоянии 25.2 см, и сигнал от этой области приходит через 168 мкс от прохождения пучка (около отметки D). При движении гидрофона вдоль пучка пик Брэгга приближается к гидрофону и соответствующая ветвь гребня DB идет справа налево. При приближении к области γ наблюдается интерференция сигналов АВ и DB и их слияние на участке γ В. Важно отметить, что сигнал от этого источника проявляется на участке D γ , в основном, в виде волны разрежения, а далее (γ В) сигнал меняет полярность, в этом направлении распространяется волна повышенного давления.

Третий источник, сигнал от которого изображен на рисунке в виде гребня AC, представляет собой заглушку, через которую пучок протонов входит в бассейн. По мере движения гидрофона вдоль пучка источник удаляется от гидрофона и траектория источника направляется слева вверх направо. Искривление траектории в начале происходит вследствие интерференции данного сигнала с сигналом от первого источника. Полярность данного сигнала совпадает с полярностью сигнала от пика Брэгга на участке D γ .

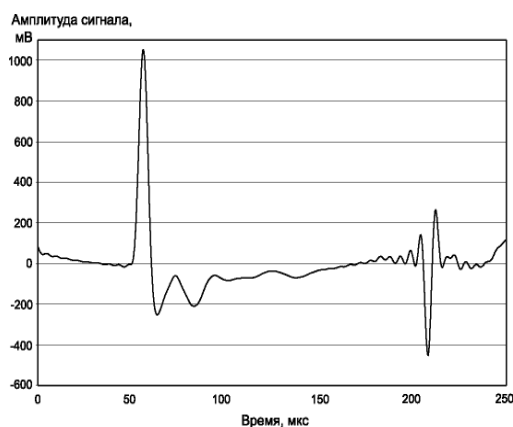


Рис. 5. Энтропия акустического сигнала

На рис. 5 приведена эпюра типичного акустического импульса р39 из серии 01 в прямом (не инвертированном) виде. Эпюра получена в точке, координата Z которой на 8.3 см больше, координаты области пика Брэгга. Первый сигнал, регистрируемый гидрофоном, приходит от области остановки пучка. Он характеризуется резким повышением давления, его длительность 10.5 мкс. Последующие несколько периодов релаксации имеют значительно меньшую амплитуду и затухают за время порядка 70 мкс. Второй сигнал – от третьего источника - характеризуется чередованием сигналов повышенного и пониженного давлений с разной амплитудой. В основном, энергия этого сигнала – разрежение, длительность – 4.5 мкс.

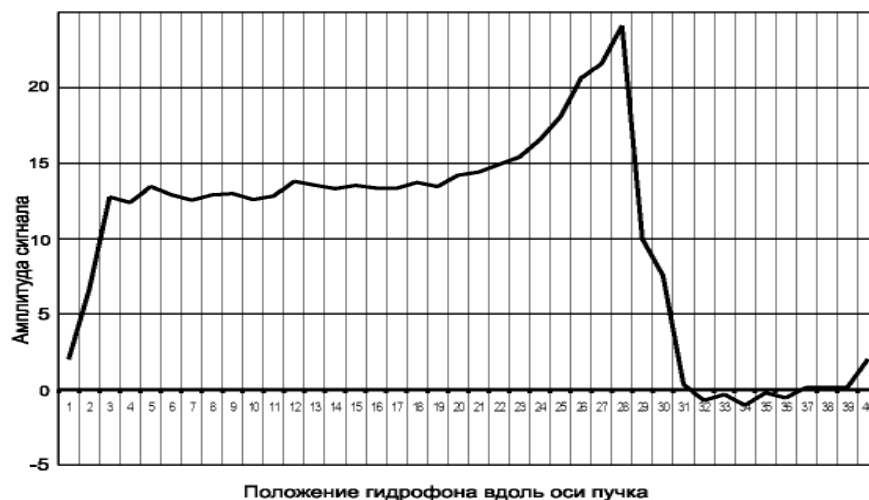


Рис. 6. Распределение акустического давления в ближней зоне ТА - зависимость амплитуды сигнала от положения гидрофона вдоль оси пучка на ближайшей к пучку трассе

На рис. 6 показано распределение акустического давления в ближней зоне ТА - зависимость амплитуды сигнала от положения гидрофона вдоль оси пучка на ближайшей к пучку трассе (измерение 01). По форме это распределение совпадает с видом кривой ионизационных потерь. Спад кривой вначале объясняется тем, что в первых двух точках гидрофон находился до точки входа пучка в воду. Резкое возрастание сигнала в конце кривой соответствует пику Брэгга.

Во втором эксперименте [27] измерения акустических сигналов выполнялись в 120 точках в плоскости, проходящей через ось пучка и расположенных на трех трассах, параллельных оси пучка и отстоящих от нее на расстоянии 2.2, 6.2 и 13.6 см. Так как эти расстояния меньше длины пробега протонов, можно считать, что измерения проводились в ближней зоне ТА. На рис. 7 показаны проекция области энергосвечения пучка и три

трассы сканирования, обозначенные символами I, II и III. Начало координат ($X=0$) совпадает с координатами начальных точек измерения для каждой трассы. Шкала, изображенная внутри рисунка, представляет номера точек, в которых производились измерения. Область прохождения пучка изображена так же, как на рис. 2. По-видимому, аналогичную пространственную форму имеет и возникающая в момент прохождения пучка ГА.

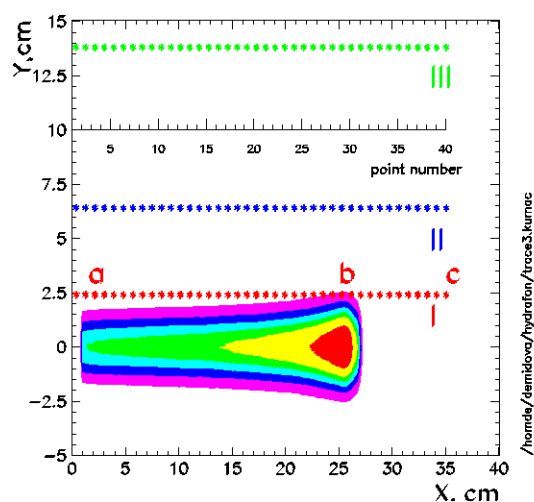


Рис. 7. Схематическое изображение пучка (проекций уровней энерговыделения) и трех трасс сканирующего гидрофона

Было выполнено три цикла измерений, по одному на каждой из трех трасс сканирования. На каждой трассе сигналы регистрировались в 40 точках, отстоящих друг от друга на величину шага сканера. Число измерений в каждой точке составляло от 4 до 10. При статистической обработке осциллограммы усреднялись по числу измерений.

На рис. 8 а, б и с представлены пространственно-временные изображения профилей сигналов, зарегистрированных соответственно для первой, второй и третьей серий измерений. Цифры по оси ординат обозначают номер точки, который однозначно связан с координатой X вдоль пучка (см. рис. 7). По оси абсцисс отложена временная развертка осциллоскопа, выраженная в единицах расстояния $R=tv$ от гидрофона до источника звука, где t (с) – время развертки, $v=1500$ м/с – скорость звука в воде.

Представлена часть сигнала, ограниченная областью наблюдения $R<0.3$ м, которая перекрывает размеры возникающей антенны, но в которой отсутствует эхо от стенок бассейна. На рисунках видны траектории, на которых располагаются сигналы от трех указанных выше источников.

Траекториям в виде протяженных гребней (волн сжатия) в направлении А-С соответствует акустический сигнал α от ближайшей точки излучающей антенны (первый источник). При этом приемник перемещается от начальной точки а (рис. 7) до точки с.

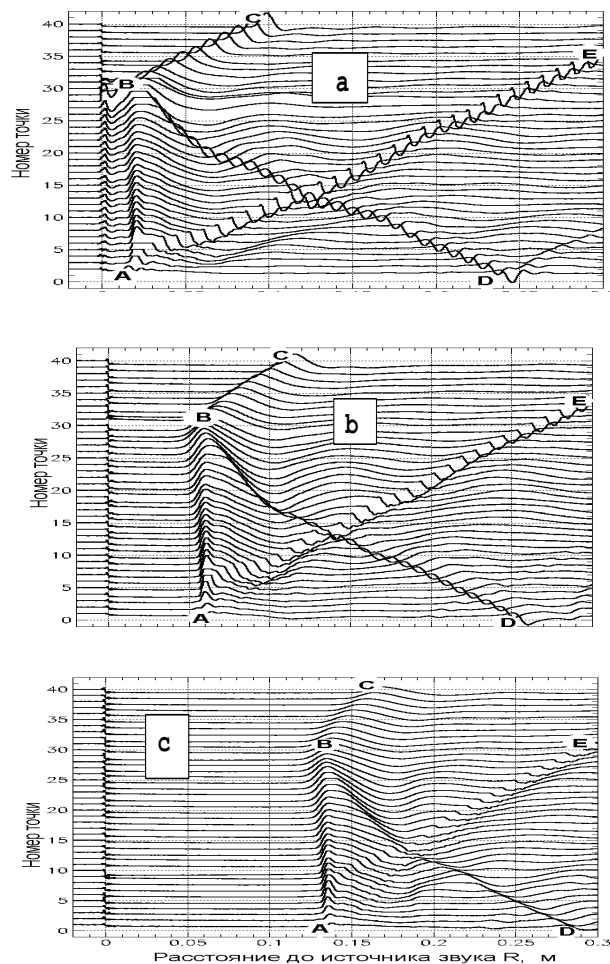


Рис. 8. Пространственно-временная структура поля на трех трассах

На рис. 8 буквой В обозначена область окончания пучка и, соответственно, акустической антенны. Соответствующее положение приемника на рис. 7 обозначено буквой б. На начальных участках (до области В) траектории проходят параллельно оси ординат на расстояниях X , равных расстояниям трасс I, II и III от оси пучка, т.к. гидрофон движется параллельно антенне и время распространения сигнала до гидрофона

остаётся постоянным. На этом участке регистрируется цилиндрическая волна, расходящаяся, в соответствии с теорией [6], от антенны. Далее гидрофон, продолжая двигаться по прямой, удаляется от антенны, время прихода сигнала увеличивается, и траектория сигнала на участке В-С изменяет свое направление.

Другим источником, сигнал γ от которого представлен на рисунке в виде траектории DC, является область так называемого пика Брэгга (в конце пробега протонов), где, как известно, резко возрастает плотность выделения энергии. Когда гидрофон расположен в начале антенны, вблизи точки входа пучка в воду (точка 2 на прямой D), область пика Брэгга находится около отметки D на расстоянии 24.6 см от гидрофона. При движении гидрофона вдоль пучка пик Брэгга приближается к гидрофону и соответствующая ветвь траектории DB идет справа налево. При приближении к области В наблюдается интерференция сигналов АВ и DB и их слияние на участке ВС. Важно отметить, что сигнал от этого источника, проявляется на участке DB, в основном в виде волны разрежения, а далее (ВС) сигнал меняет полярность, в этом направлении распространяется волна повышенного давления.

Траектория АЕ сигнала β от третьего источника направляется слева вверх направо. Это означает, что вначале гидрофон находился рядом с источником звука, но по мере перемещения гидрофона вдоль пучка расстояние до источника увеличивается. Единственной областью, обладающей таким свойством, является область входа пучка в воду, и, по-видимому, источником этого сигнала является заглушка, отделяющая водную мишень от окружающей среды. Полярность сигнала совпадает с полярностью сигнала от пика Брэгга на участке DB. Искривление траектории вначале происходит вследствие интерференции данного сигнала с сигналом от первого источника.

Приведем теперь опубликованные в работе [28] результаты третьего эксперимента. Он был направлен на изучение свойств акустических сигналов, излучаемых из области пика Брэгга ТА, а точнее, зависимости амплитуды и длительности излучаемых ТА импульсов от координат точки приема и от угла наблюдения. Параметры импульса здесь оцениваются по первому положительному полупериоду, что отвечает принятой традиции [2,6,9].

В данном случае применялся сконструированный и изготовленный В.И. Албулом первичный преобразователь с тангенциально-поляризованным чувствительным элементом цилиндрической формы (диаметр 18 мм, высота 20 мм, пьезокерамика ЦТС-19). Средняя чувствительность составляла около 1,6 мВ/Па в диапазоне частот 5...50 кГц с неравномерностью около 8 дБ. К выходу преобразователя подключался

предусилитель типа Bruel&Kjaer 2635. Оцифровка сигналов производилась осциллографом ТЕКТРОНИХ TDS 3032, связанным с персональным компьютером посредством интерфейса GPIB. Информация в объеме 104 точек записывалась на диск компьютера в формате *.sht. Кроме отклика гидрофона, записывался сигнал с индукционного датчика. Трасса гидрофона проходила в горизонтальной плоскости XZ перпендикулярно оси пучка (вдоль которой направлена ось Z измерительной системы координат) и пересекала ось пучка на расстоянии 356 мм от точки входа пучка в воду, что соответствует расстоянию в 100 мм от конца ионизационного пробега протонов. Сканер перемещал гидрофон дискретно с шагом 4.5 мм в пределах отрезка оси X [-150 мм; 180 мм].

Для объяснения некоторых неочевидных результатов эксперимента в лаборатории В.С. Демидова было выполнено полномасштабное моделирование с помощью программы GEANT-3.21. Моделирование процесса генерации и распространения сигнала выполнялось в первом приближении в предположении пропорциональности амплитуды сигнала той энергии, которая выделяется при ионизации протоном атомов среды без учета термодинамических и упругих свойств среды, приводящих к релаксации.

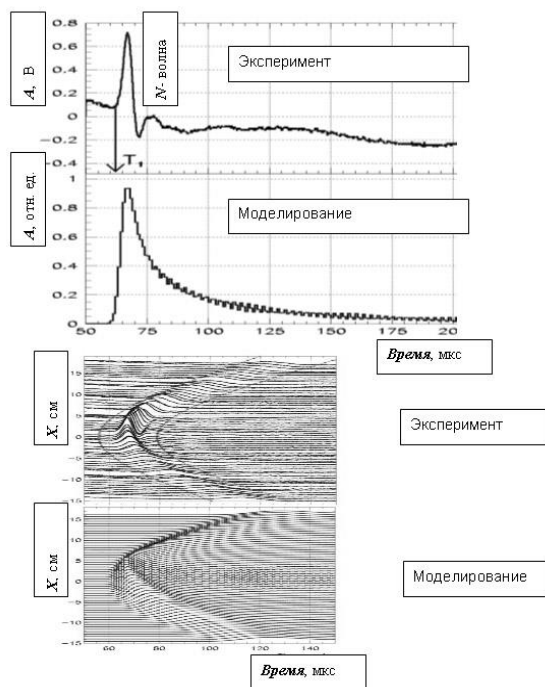


Рис. 9. Радиационно-акустические сигналы: эпора одиночного сигнала и ПВС поля. Приведены результаты эксперимента и математического моделирования

На рис. 9 представлен (вверху) отклик гидрофона в точке № 32 трассы ($X = -7.6$ мм), зарегистрированный в интервале времени 50-200 мкс на фоне электрической наводки. Акустический импульс, приходящий при $t=T_1$ и имеющий характерную для радиационно-акустических сигналов форму N-волны, порожден, очевидно, пиком Брэгга, который является ближайшей к приемнику областью ТА. Непосредственно под ним показан смоделированный отклик в той же точке в соответствующем интервале времени. Так как в модели не учитываются упругие свойства водной среды, существенные для формирования и распространения акустических сигналов, модельные сигналы не воспроизводят биполярной формы реальных сигналов. Тем не менее, они позволяют понять основные особенности возникающего акустического поля. Модельный сигнал также начинается при $t=T_1$ и достигает максимума в тот же момент времени, что и экспериментально наблюдаемый.

Как и в работе [27], по экспериментальным данным построена ПВС радиационно-акустического поля, изображение которой приведено на том же рис. 9 (второе снизу). На этом же рисунке нижний график изображает ПВС, полученную в результате моделирования. Обе ПВС представлены в виде т.н. «водопада». По оси абсцисс отложено время в микросекундах. Для верхнего рисунка это время развертки осциллоскопа, модельные картины изображены в том же масштабе. Интервал времени выбран так, чтобы условия наблюдения сигнала были оптимальны. По оси ординат – координаты X гидрофона в момент регистрации. Для экспериментальной ПВС по оси аппликат отложен отклик A гидрофона, нормированный на одинаковое число пучковых протонов, равное 10^{10} частиц в импульсе. Для модельной ПВС ось аппликат представляет собой смоделированный сигнал в относительных единицах. На обеих картинах наблюдается огибающая максимальных амплитуд в форме параболы, временные координаты которой соответствуют моментам прихода на гидрофон сигнала от области пика Брэгга ТА. Некоторые качественные заключения, общие для экспериментального и модельного сигналов, можно сделать из этих картин относительно эволюции N-волны. В области $t \cong 70$ мкс и $X \cong 0$ длительности импульсов минимальны и увеличиваются по мере удаления приемника от источника. Что касается амплитуды сигнала, то она в дальней точке минимальна и увеличивается при уменьшении $|X|$. Таким образом, может быть сделан вывод, что модель правильно воспроизводит качественные особенности поля. Длительность первого полупериода отклика гидрофона составляет ~ 35 мкс и ~ 7 мкс для дальней и ближней точки, соответственно. Такое изменение частоты сигнала в зависимости от направления (угла) регистрации отражает геометрические размеры сечения антенны в данном

направлении – большие частоты соответствуют меньшим размерам излучающей области.

Полученные экспериментально значения амплитуды отклика гидрофона и вычисленные для модельных сигналов значения позволяют получить экспериментальное и модельное угловые распределения излучения ТА. На рис. 10 эти зависимости приведены в полярных координатах. В качестве радиус-вектора для i -ой точки бралось значение A_i , а в качестве угла между осью пучка и направлением излучения величина $\theta = \arcsin(X_i / C_0 \tau_i)$. Аналогично строилась диаграмма и по результатам моделирования.

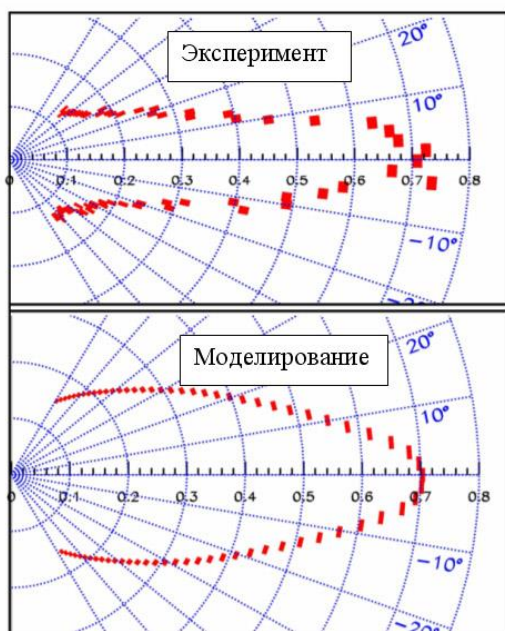


Рис. 10. Угловое распределение амплитуд радиационно-акустических сигналов

Эксперимент на электронном пучке

Постановка эксперимента с электронным пучком была предложена в 2005 году Борисом Саркисовичем Ишхановым, ознакомившимся с результатами работ группы ВНИИФТРИ - ИТЭФ. Были известны две работы с электронными пучками, выполненные советскими исследователями под руководством Л.М. Лямшева в начале 80-х годов [2,30]. Было зарегистрировано всего несколько сигналов, использовался миниатюрный гидрофон с низкой (около 5 мкВ/Па) чувствительностью, поэтому хорошей помехоустойчивости получить не удалось.

В эксперименте [29], который проводился на электронном ускорителе НИИЯФ МГУ, активное участие приняли ученики профессора Б.С.

Ишханова Андрей Ермаков и особенно Ольга Ершова. Энергия электронов в эксперименте составляла 50 МэВ, длительность импульса ускорителя – 8 мкс, частота повторения импульсов – 10 Гц. Пространственная форма сечения пучка - квазиэллиптическая (размер в вертикальной плоскости около 5 мм, в горизонтальной - около 2.5 мм). Ток пучка контролировался с помощью трансформаторного датчика и в среднем составлял 2 мА. Это соответствует средней интенсивности около 10^{11} частиц в импульсе. Суммарное энерговыделение в импульсе составляло порядка $5 \cdot 10^{18}$ эВ. В качестве среды, в которой происходило торможение пучка, использовалась дистиллированная вода, заполнявшая тот же бассейн из оргстекла, который применялся ранее в акустических экспериментах на ускорителе протонов [26-28]. Уровень воды в эксперименте составлял 390 мм, ее средняя температура была равна 20.5°C. Размеры водного объема были достаточными, чтобы при анализе данных разделить прямой сигнал от пучка и сигналы, отраженные от границ.

Измерения проводились с помощью гидрофона типа ГИ53 (ныне серийно выпускаемого ВНИИФТРИ). Образец для эксперимента тогда любезно предоставил разработчик Борис Петрович Смирнов. Гидрофон подключался через два усилителя, дававших последовательно усиление 50 дБ в полосе частот 20 Гц -200 кГц и 10 дБ в полосе частот 10-100 кГц. Считывание информации производилось с помощью 2-лучевого осциллоскопа ТЕКТРОНИХ TDS 3032, управляемого с помощью ПК. Время наблюдения сигнала составляло 1 мс, каждое измерение содержало 10^4 точек по 0.1 мкс. Запуск осциллоскопа производился синхроимпульсом от генератора, управляющего работой ускорителя, и предшествовал по времени приходу пучка на мишень приблизительно на 4 мкс.

Осциллограммы акустических сигналов были зарегистрированы в 100 точках на прямолинейной трассе, коллинеарной оси пучка электронов и расположенной в горизонтальной плоскости, проходящей через ось пучка. Расстояние между трассой и осью пучка составляло $X_0 = 6.5$ см. Гидрофон перемещался вдоль трассы с помощью электромеханического сканера с дистанционным управлением. Шаг сканера составлял 4.45 мм. Координата Z начальной точки измерения совпадала с началом акустической антенны.

На рис. 11 пунктирной линией показан фрагмент сигнала с гидрофона, зарегистрированного на расстоянии 8 см от начала сканирования. По оси абсцисс отложено время от момента прихода синхроимпульса в мкс, по оси ординат – величина напряжения в вольтах. Интервал времени действия электронного пучка (4-12 мкс) отмечен стрелками. Акустический сигнал, возбуждаемый пучком, расположен в интервале от 34 до 85 мкс и имеет биполярную форму. При $t=18$ мкс наблюдается электромагнитная наводка, связанная с работой ускорителя, по амплитуде превышающая полезный

сигнал в несколько раз и затрудняющая анализ при малых временах (< 36 мкс) и, следовательно, при малых расстояниях между источником и приемником звука. Существенно уменьшить влияние наводки можно, вычитая ее из зарегистрированного сигнала. Наводка была измерена при работе ускорителя в отсутствие электронного пучка. Результат вычитания показан на рисунке сплошной линией. Видно, что процедура вычитания наводки позволяет существенно подавить влияние паразитных сигналов при $t < 36$ мкс и отодвинуть нижнюю границу исследуемой области до 2-5 мкс от начала сигнала, что важно для уточнения механизма возникновения радиационно-акустических волн. Результаты, представленные ниже, получены с применением данной процедуры.

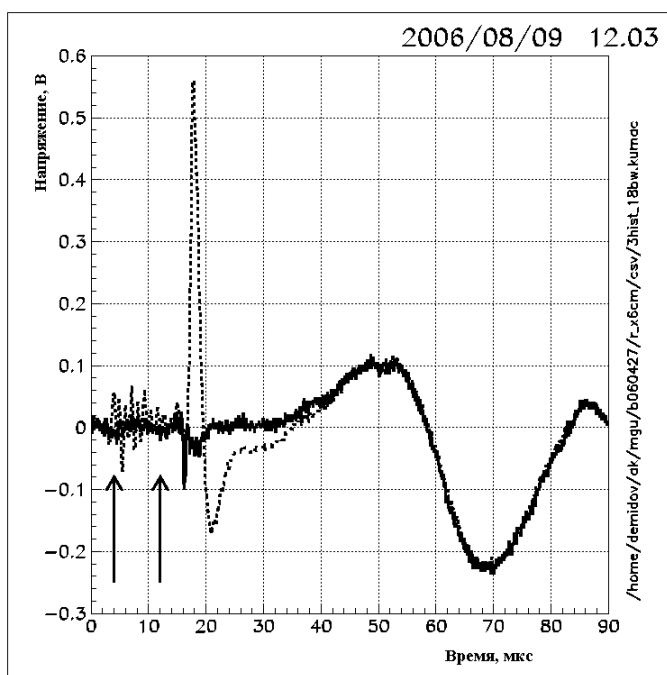


Рис. 11. Сигнал, зарегистрированный гидрофоном на расстоянии $Z = 8$ см от входа пучка и $X_0 = 6,5$ см от его оси. Пунктиром показан исходный сигнал, сплошной линией – сигнал после вычитания наводки. Стрелками отмечено время воздействия пучка электронов

На рис. 12 изображены в трехмерном виде эпюры сигналов, зарегистрированные в 66 точках на трассе измерения. Сигналы нормированы на 1 мА тока пучка. По оси ординат указаны расстояния вдоль трассы в сантиметрах, по которым можно вычислить координаты точек в пространстве бассейна. Акустические сигналы образуют в плоскости ($t-Z$) три траектории, две из которых (AB и DE) имеют в качестве источника область распространения пучка электронов, третья (abe) является отражени-

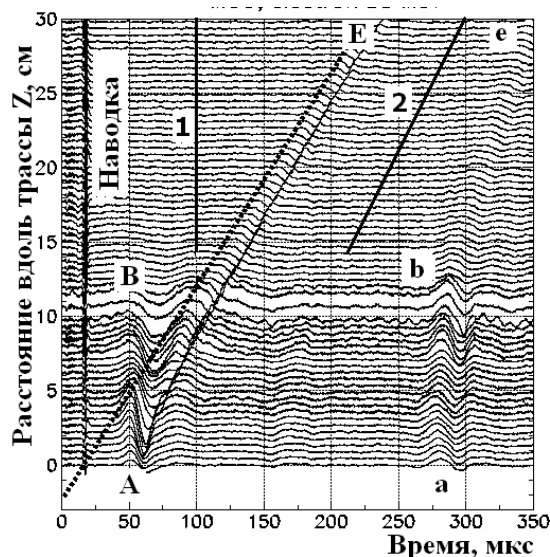


Рис. 12. Пространственно-временная структура акустического поля, создаваемого в воде пучком электронов

ем сигналов исследуемого источника от дна бассейна. Траектории АВ в виде гребней переменной амплитуды соответствует первая полуволна акустического сигнала (полуволна сжатия) от ближайшей точки излучающей цилиндрической антенны. Траектория почти параллельна оси расстояний, т.к. время распространения данного сигнала от источника до приемника одинаково с точностью до изменения поперечных размеров электронно-фотонного ливня. Сигналы, образующие траекторию DE, начинаются с полуволны разрежения. Судя по времени появления сигналов, по форме (прямая линия) и направлению траектории, их источник находится в окрестности заглушки, отделяющей водную среду от воздуха. Ранее подобные сигналы от границы мишени были зарегистрированы в экспериментах с электронным [30] и протонным (нашей группой - [26,27]) пучками.

Заключение

Резюмируем теперь результаты «радиационной активности» гидроакустиков ВНИИФТРИ, проявившейся в первое десятилетие третьего тысячелетия.

Полученное в работе [24] асимптотическое решение задачи терморadiационного возбуждения звука пучком высокоэнергетических частиц обладает несомненной новизной и, в сравнении с известными аналитическими описаниями [2, 14], дает более удобный математический аппарат для количественного анализа акустического поля ионизирующих

излучений, а также обеспечивает лучшее совпадение с результатами экспериментов. Разработан, аппаратно реализован и апробирован метод сканирующего гидрофона для исследования пространственно-временной структуры гидроакустического поля, создаваемого пучком высокоэнергетических частиц. Перемещение гидрофона осуществляется с помощью разработанного и изготовленного В.И. Албулом прецизионного электромеханического сканера, позволяющего устанавливать гидрофон дискретно с шагом 4,5/9 мм в пределах линейной апертуры длиной 0,4 м. При этом электрическое управление сканером производится из аппаратного зала. Это позволило, в отличие от методик, применявшихся ранее учеными США [9,10] и СССР [2,11], избежать частых посещений зоны радиационного воздействия и необходимости многократной настройки параметров пучка.

В экспериментах на протонном синхротроне ИТЭФ [26-28] впервые получена с хорошим разрешением пространственно-временная структура гидроакустического поля, возбуждаемого пучком. Форма зарегистрированных акустических импульсов весьма близка к теоретической [2,14,24], чего не наблюдалось в других известных нам экспериментах. Зависимость амплитуды сигнала в ближней зоне от расстояния вдоль оси пучка измерена с существенно лучшим разрешением (43 точки на апертуре 0,4 м), чем в предшествующих публикациях американских [9] и отечественных [11] исследователей (6 и 8 точек соответственно). В результате она содержит, в отличие от приведенных в упомянутых работах кривых, ярко выраженный максимум, соответствующий пику Брэгга. Впервые было получено угловое распределение амплитуды акустического сигнала, возбуждаемого областью пика Брэгга ТА в направлении продолжения оси пучка. Угловое распределение, полученное путем компьютерного моделирования по программе GEANT, имело хорошее совпадение с измеренным в эксперименте. В работах, проведенных на электронном ускорителе НИИЯФ МГУ [29], были измерены параметры гидроакустического поля, создаваемого пучком электронов; впервые дано детальное описание пространственно-временной структуры такого поля.

Результаты работ нашего коллектива были замечены в стране и в мире. Начиная с 2005 года, они постоянно цитируются - см., например, статьи ученых США, Англии, Германии, Италии, России, Канады [15-20,31-33]. Последняя из них [33] вообще представляет собой подробный анализ наших публикаций, наряду с утверждением, что программное моделирование авторов дает лучшее совпадение с результатами наших экспериментов, чем наше собственное. Доклады, представлявшиеся нами на ряде симпозиумов [34-39], вызывали неизменный интерес и активное обсуждение. В 2006 году на работы обратили внимание «Новости физики в Интернете» — раздел

журнала «Успехи физических наук», ежемесячно публикующего обзоры современного состояния наиболее актуальных проблем физики. А популяризаторы науки – сайт «Элементы.ру» - откликнулись на очередную нашу статью заметкой «Звучание электронного луча поможет детектировать нейтрино» (31.10.06).

В целом, опубликованные нашим коллективом теоретические и экспериментальные результаты по уровню превосходят полученные ранее в отечественной и зарубежной практике и дают качественно новый уровень описания радиационно-акустических эффектов в водной среде. Успеху исследований способствовал состав научного коллектива: в него, как уже упоминалось, входили, наряду с гидроакустиком ВНИИФТРИ, также специалисты в области физики высоких энергий ИТЭФ им. А.И. Алиханова и МГУ им. М.В. Ломоносова. Особо хочется отметить роль преждевременно ушедшего от нас прекрасного ученого и высокоталантливого разработчика Владимира Ивановича Албула. Во ВНИИФТРИ он оставил о себе долгую и хорошую память. Именно такого склада люди внесли определяющий вклад в развитие и достижения советской и постсоветской науки.

Развитие представлений о гидроакустическом поле ионизирующего излучения необходимо для планируемой в ряде международных проектов реализации подводных нейтринных телескопов. Они должны существенно расширить возможности детектирования «неуловимых» космических частиц сверхвысоких энергий. Исследования помогут также решить ряд практических задач, связанных с лечением злокачественных опухолей воздействием интенсивных протонных пучков, которое в ряде случаев оказывается эффективнее других, более традиционных медицинских средств.

Литература

1. Залюбовский И.И., Калиниченко А.И., Лазурик В.Т. Введение в радиационную акустику. - Харьков: Изд-во ХГУ, 1986, 168 с.
2. Лямшев Л.М. Радиационная акустика. - М.: Наука. Физматлит, 1996, 304 с.
3. Bell A.G. On the Production and Reproduction of Sound by Light // Am. J. Sci. 1880. XX. P. 305. Roentgen W.C. On tones produced by the intermittent irradiation of a gas // Philos. Mag. 1981. V.11. P.308.
4. Аскарьян Г.А. Гидродинамическое излучение от треков ионизирующих частиц в стабильных жидкостях // Атомная энергия. 1957.- Т.3.- № 8.- С.152.

5. Аскарьян Г.А. Излучение поверхностных и объемных волн сжатия при налетании нерелятивистского электронного потока на поверхность плотной среды // ЖТФ. 1959.- Т.29.- С.267.
6. Аскарьян Г.А., Долгошеин Б.А. Акустическая регистрация нейтрино высоких энергий на больших глубинах // Препринт ФИАН СССР. №160.-М., 1976.- 17с.
7. Аскарьян Г.А., Долгошеин Б.А. Акустическая регистрация нейтрино высоких энергий // Письма в ЖЭТФ. 1977.- Т. 25.- №5.- С. 232-233.
8. Askariyan G.A., Dolgoshein B.A., Kalinovskiy A.N., Mokhov N.V. Acoustic detection of high energy particles showers in water. Nucl. Instr. and Meth., 1979. V.164, p. 267.
9. Sulac L., Armstrong T., Baranger H. et al. Experimental studies of the acoustic signature of proton beams transversing fluid media Nucl. Instrum. and Meth. 1979. V.161, p..203.
10. Hunter S.D., Jones W.V., Malbrough O.J. Acoustic signals of non-thermal origin from high energy protons in water. J. Acoust. Soc. Amer. 1981. V.69, № 6, p..1557.
11. Данильченко И.А., Петрухин А.А., Шестаков В.В. и др. Исследование характеристик акустического сигнала в ближней зоне пучка протонов // В кн. Радиационная акустика. - М.: Наука. 1987.- С.51.
12. Воловик В.Д., Попов Г.Ф. Упругие волны в стабильных жидкостях от импульсных пучков // Письма в ЖТФ. 1975. - Т.1.- Вып.13.- С.601.
13. Голубничий П.И., Калюжный Г.С., Яковлев В.И. и др. О механизме генерации акустического излучения в жидкости пучками ионизирующих частиц // Письма в ЖТФ. - Т.7.- Вып.5.-С.272.
14. Деденко Л.Г., Железных И.М. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 1997. Т.61.- №3.- С.593; 1999. Т.63.- №3.- С. 589. Буткевич А.В. и др. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1998.-Т.29.- Вып.3.- С.659.
15. Nahnhauser R. Alternative Detection Methods for Highest Energy Neutrinos. - Nuclear Physics B (Proceedings Supplements). 2005, 143, p.387.
16. Thompson L.F. Acoustic Detection of Ultra-High Energy Neutrinos. - Nucl. Instr. and Meth. A. 2008.- V.588. Issue 1-2, p.155.
17. Vandenbroucke J., Gratta G., Lehtinen N. Experimental Study of Acoustic Ultra-High-Energy Neutrino Detection. - Astrophys. J. 2005, 621, p. 301.
18. Karg T., Anton G., Graf K. et al. Development of acoustic devices for ultra-high energy neutrino detectors - Int. J. Mod.Phys. 2006, A21S1, p..92.
19. Ляшук В.И., Новиков Е.Г. Акустические явления от широких атмосферных ливней на Байкале // Известия РАН. Сер. Физ. 2007.- Т. 71.- № 4.- С. 602.
20. Ангинольфи М., Осипенко М.В., Плотников А.Б., Черняев А.П. Проектирование эксперимента по изучению осцилляций нейтрино на

- глубоководном нейтринном телескопе NEMO // Вестник МГУ. 2005.- №5.- С. 13.
21. Железных И.М. Разработка и создание альтернативных детекторов космических нейтрино ультравысоких и экстремально высоких энергий - Отчет ИЯИ РАН, 2004 //www.inr.ru/rep2004.
 22. Албул В.И., Бычков В.Б., Гусев К.Е., Демидов В.С., Курчанов А.Ф., Лукьяшин В.Е. и др. Измерение параметров акустического излучения, сопровождающего торможение в воде пучка протонов с энергией 125 и 200 мэВ до остановки // Препринт ИТЭФ. № 25-00. - М., 2000.
 23. Албул В.И., Бычков В.Б., Гусев К.Е., Демидов В.С., Курчанов А.Ф., Лукьяшин В.Е. и др. Измерение параметров акустического излучения, сопровождающего замедление интенсивного пучка протонов в воде // Приборы и техника эксперимента, 2001.- №3.- С.50.
 24. Кистович А.В. Терморadiационное возбуждение звука. – В кн.: Проблемы измерения параметров акустических полей и обработки информации. – М.: ВНИИФТРИ, 2004.- С.57.
 25. GEANT Detector Description and Simulation Tool (Long Writeup W5013) //CERN Program Library, CERN. - Geneva, 1995.
 26. Албул В.И., Бычков В.Б., Васильев С.С., Демидов В.С., Демидова Е.В., Краснов Н.К., Курчанов А.Ф., Лукьяшин В.Е. Акустическое поле, создаваемое пучком останавливающихся в водной среде протонов// Акуст. журн. 2005.- Т.51.- №1.- С.47.
 27. Албул В.И., Бычков В.Б., Васильев С.С., Демидов В.С., Демидова Е.В., Краснов Н.К., Курчанов А.Ф., Лукьяшин В.Е. Измерение ультразвукового поля, возникающего при торможении пучка протонов в воде // Приборы и техника эксперимента. 2004.- №4.- С.89.
 28. Бычков В.Б., Демидов В.С., Демидова Е.В., Краснов Н.К. и др. Угловое распределение акустического излучения, создаваемого в воде пучком ускоренных протонов // Акуст. журн. 2010.- Т. 56.- № 4.- С. 479.
 29. Бычков В.Б., Демидов В.С., Демидова Е.В., Ершова О.Д., Ишханов Б.С., Масляный В.П. и др. Исследование акустического поля, создаваемого в воде пучком электронов с энергией 50 МэВ // Вестник Московского университета. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2007.- № 3.- С. 25.
 30. Лямшев Л.М., Челноков Б.И. Генерация звука проникающим излучением в конденсированных средах. // В кн. Радиационная акустика. - М.: Наука, 1987.- С.58.
 31. Graf K., Anton G., Kappes A. et al. Testing thermo-acoustic sound generation in water with proton and laser beams. - Int. J. Mod. Phys. 2006. A21S1, p.127.

32. C. Richardt, G. Anton, K. Graf, et al. Reconstruction methods for acoustic particle detection in the deep sea using clusters of hydrophones. - *Astroparticle Physics*. 2009. V. 31. Is. 1, p. 19.
33. Алмалиев А.Н., Баткин И.С., Копытин И.В., Лукин П.В. Методы отслеживания траектории пучка тяжелых заряженных частиц в конденсированной среде // *Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика*. 2012.- № 2.- С.5.
34. V.B. Bychkov, S.S. Vasilijev, V.S. Demidov. DIAGNOSTIC OF IONIZING RADIATIONS BY HYDROACOUSTIC MEANS. *Nonlinear Acoustics at the Beginning of 21st Century // Proceedings of 16th International Symposium on Nonlinear Acoustics (ISNA-16)*. M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 2002. V.2.- P. 909.
35. Albul V.I., Bychkov V.B., Gusev K.E., Demidov V.S., Demidova E.V., Kurchanov A.F., Lukijashin V.E., Vasilijev S.S. DIAGNOSTIC OF INTENSE PROTON BEAMS BY HYDROACOUSTIC MEANS. *Hydroacoustics. / Annual Journal. Gdynia (Poland)*. 2003. V.6, Proceedings of XX-th Symposium on Hydroacoustics in Gdansk (may 2003), p. 293.
36. V.I. Albul, V.B. Bychkov, V.S. Demidov, V.I. Lyashuk et al. ITP investigation of acoustic phenomena from high energy particles./ *International Workshop on Acoustic and Radio Neutrino Detection Activities (ARENA 05)*, Zeuthen, Germany, 17-19 May 2005. - Published in *Int. J. Mod. Phys*. 2006. A21S1, p.122.
37. Бычков В.Б., Демидов В.С., Ершова О.Д., Ишханов Б.С., Масляный В.П., и др. Исследование акустического поля, создаваемого пучком электронов с энергией 50 мэВ в воде // *Тезисы научной конференции МГУ «Ломоносовские чтения '07»*. - М.: МГУ, 2007.
38. Бычков В.Б., Цыганков В.Б. Анализ пространственно-временной структуры акустического поля. Возможности нетрадиционного применения. - В кн.: *Труды IX Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. – СПб: Наука, 2008.- С. 675.
39. Бънзаров Ж.И., Бычков В.Б., Демидов В.С. Радиационная акустика. Методы и средства измерений. – В кн.: *XIX-th Nat. Sci. Symp. with International participation “Metrology and Metrological Assurance”/Proceedings*. - Sozopol, Bulgaria, 2009, p. 198.