

## RADIATION ACOUSTICS

L. M. LYAMSHEV

*Radiation acoustics is a scientific branch developing at the junction of acoustics, nuclear physics and high energy and elementary particle physics. It based on the studies of radiation-acoustic effects. These effects are the results of penetrating radiation (particle beams or single particles) action on a substance. Thermoradiation excitation of sound in condensed matter and its applications are discussed.*

**Радиационная акустика – научное направление, развивающееся на стыке акустики, ядерной физики, физики высоких энергий и элементарных частиц. Ее основу составляют исследования и применения радиационно-акустических эффектов, возникающих при действии проникающего излучения – пучков частиц (протонов, электронов, фотонов и др.) и отдельных частиц на вещество. Приводятся сведения о терморационной генерации звука в конденсированной среде и о применениях этого эффекта.**

## РАДИАЦИОННАЯ АКУСТИКА

Л. М. ЛЯМШЕВ

Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный Московской обл.

### ВВЕДЕНИЕ

Радиационная акустика – новое научное направление, развивающееся на стыке акустики, ядерной физики и физики высоких энергий и элементарных частиц. Ее основу составляют исследования и применения радиационно-акустических эффектов, возникающих при действии проникающего излучения (радиации) на вещество. Проникающее излучение – это пучки ускоренных частиц (электронов, протонов и др.) и отдельные частицы, например мюоны, нейтрино. Сюда можно отнести и пучки фотонов (лазерное, рентгеновское и синхротронное излучение).

Сложилось определенное представление о механизмах возбуждения звука проникающим излучением. Их обычно связывают с физическими явлениями (процессами), в результате которых энергия проникающего излучения преобразуется в акустическую энергию. Эти процессы зависят от вида излучения, вещества, в котором это излучение поглощается, и режима выделения энергии в веществе. Механизмы генерации звука многочисленны и по своей эффективности неравнозначны. Выделение теплоты – одно из наиболее универсальных физических явлений, протекающих при поглощении проникающего излучения. Тепловая энергия может различными путями частично преобразовываться в энергию звуковых волн. При умеренных плотностях выделившейся энергии, когда не происходит фазовых превращений в веществе, генерация звука происходит вследствие нагревания и теплового расширения среды в области поглощения проникающего излучения. Это терморационный (термоупругий) механизм генерации звука. Звуковые поля в этом случае удается описать в рамках линейной теории.

Значительно сложнее выглядит картина генерации звука при больших плотностях вводимой в среду энергии проникающего излучения. Возникающие в этом случае закономерности носят нелинейный характер. Существенными оказываются эффекты, обусловленные возрастанием скорости расширения нагреваемого объема среды (гидродинамическая нелинейность), а также изменением термодинамических характеристик вещества в процессе действия проникающего излучения (тепловая нелинейность). При дальнейшем росте плотности выделившейся тепловой энергии развиваются более сложные процессы генерации звука, связанные с фазовыми переходами, например в условиях так называемого

пузырькового механизма генерации звука проникающим излучением и образования ударных волн.

Существуют и нетепловые механизмы генерации звука: динамический, черенковский, стрикционный и др., однако к настоящему времени наиболее продвинутыми оказались исследования терморационного возбуждения звука. Мы познакомим читателя с некоторыми закономерностями терморационного возбуждения звука при непрерывном (модулированном) и импульсном воздействии проникающего излучения на конденсированную среду. Будут рассмотрены особенности генерации акустических сигналов одиночными частицами. Кратко обсуждаются некоторые приложения радиационной акустики. Сразу скажем, что масштабы применений довольно велики — от микроэлектроники (растровая радиационно-акустическая микроскопия) до геофизики (нейтринно-акустическое зондирование Земли) и астрофизики (регистрация космических нейтрино и мюонов сверхвысоких энергий гигантскими акустическими детекторами в глубинах Мирового океана).

## ОТ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА К РАДИАЦИОННОЙ АКУСТИКЕ

Исследования радиационно-акустических эффектов были стимулированы главным образом прогрессом в области физики высоких энергий и элементарных частиц. Физика элементарных частиц за последние десятилетия достигла больших успехов. С помощью ускорителей были получены частицы гигантских энергий порядка десятков, сотен и тысяч гигаэлектронвольт (ГэВ) и открыто огромное число частиц, подверженных удивительным взаимодействиям и взаимопревращениям. По мере создания более мощных ускорителей, открывающих возможности продвижения исследований элементарных частиц в области все более высоких энергий, ускорители, первоначально предназначенные для чисто фундаментальных исследований, все шире применяются в исследованиях по физике твердого тела, биологии, химии и в медицине. Они уже используются и в радиационно-акустических исследованиях и технологиях.

Начало радиационной акустики в широком смысле связано с открытием оптико-акустического эффекта — генерации звука в замкнутом объеме газа при прохождении через него прерывистого (модулированного) света, другими словами, при взаимодействии модулированного оптического излучения (модулированного пучка фотонов) с веществом (газом) [1]. Исследования оптико-акустического эффекта послужили, как известно, основой развития оптоакустики и оптико-акустической спектроскопии газов и конденсированных сред.

Первые исследования непосредственно радиационно-акустических эффектов относятся к 50–60-м годам. В 1955 году, например, Д. Глэзер и Д. Рам [2]

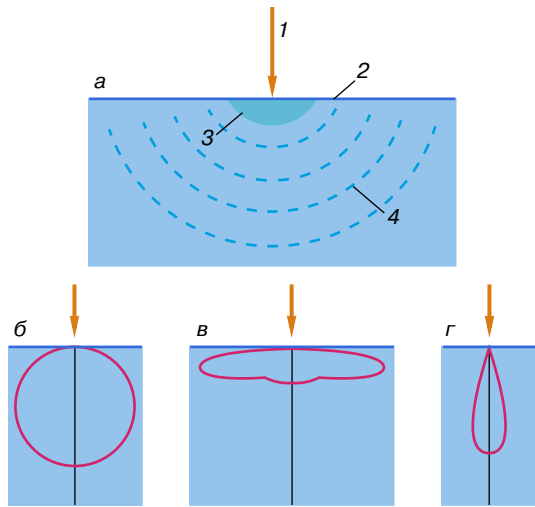
сообщили о наблюдении частиц в метастабильной вскипающей жидкости в пузырьковой камере по звуковым (вибрационным) сигналам, возникающим в результате рождения и эволюции пузырьков на треках частиц. Г. Аскарьян [3] в 1957 году рассмотрел возбуждение ультразвуковых и гиперзвуковых волн заряженными частицами в плотных средах вследствие локальных перегревов и рождения микрополостей. В 1963 году Р. Уайт [4] наблюдал генерацию звука пучком электронов в твердом теле. Многочисленные исследования возбуждения звука проникающим излучением были выполнены главным образом учеными СССР и США в 70–80-е годы.

Значительным стимулом для развития работ по радиационной акустике послужили перспективы ее приложений. К ним следует отнести в первую очередь растровую радиационно-акустическую микроскопию конденсированных сред, акустическое детектирование мюонов и нейтрино сверхвысоких энергий в океане, а также открывающиеся перспективы использования сверхмощных ускорителей будущих поколений для создания пучков сверхвысокоэнергетических нейтрино и использования этих пучков в геоакустике.

## ВОЗБУЖДЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ЗВУКА

Характеристики акустического поля, генерируемого проникающим излучением в конденсированной среде, зависят от особенностей поглощения излучения в веществе. Законы поглощения определяются типом частиц. Интенсивность электромагнитного излучения (пучка фотонов), например, при его поглощении в веществе имеет вид  $I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$ , где  $\mu$  — коэффициент поглощения. Величину  $1/\mu$  можно назвать длиной пробега частиц в веществе. Этот экспоненциальный закон оказывается справедливым и для релятивистских электронов. Для протонов характерно наличие пика на кривой, характеризующей зависимость поглощения от длины остаточного пробега протона в веществе. В ядерной физике этот пик получил название пика Брэгга. Для нейтронов не существует универсальных аналитических законов и приходится пользоваться эмпирическими зависимостями.

Пусть пучок проникающего излучения радиуса  $a$  (фотонов или релятивистских электронов), интенсивность которого промодулирована по гармоническому закону  $I(t) = I_0(1 + m \cos \omega t)$ , где  $m$  — индекс модуляции и  $\omega$  — круговая частота, падает на свободную поверхность жидкости. У поверхности возникает виртуальный или, как принято говорить, терморационный источник звука вследствие периодического нагревания и теплового расширения области жидкости, где поглощается проникающее излучение (рис. 1). Теоретически и экспериментально установлено, что амплитуда звуковых волн (звукового давления)  $p$ , излучаемых этим источником,



**Рис. 1.** а – схема генерации звука проникающим излучением в жидкости: 1 – направление падения пучка модулированного излучения, 2 – граница раздела воздух (вакуум)–жидкость, 3 – область поглощения проникающего излучения, 4 – фронты звуковых волн в жидкости; б–г – характеристики направленности (угловые зависимости звукового давления) источника звука, б – размеры источника малы, в, г – направленность излучения источников стержневого типа и в виде диска

растет прямо пропорционально мощности проникающего излучения  $W$  в пучке. Угловая зависимость звукового поля или направленность определяется геометрическими размерами виртуального терморadiационного источника звука и длиной звуковой волны  $\lambda$ , другими словами, параметрами  $a\lambda^{-1}$  и  $(\mu\lambda)^{-1}$ .

Если  $a\lambda^{-1} \ll 1$  и  $(\mu\lambda)^{-1} \ll 1$ , наблюдается так называемое дипольное излучение звука, поскольку выполнение этих условий означает, что у поверхности жидкости действует монополюсный (объемный) гармонический источник звука. Звуковое поле монополюсного источника у поверхности свободной жидкости представляет собой поле диполя (рис. 1, б–г). Напомним, что монополь – это точечный источник звуковых волн. Примером может служить пульсирующая в жидкости сфера, размеры которой очень малы по сравнению с длиной звуковой волны. Диполь – это два близко расположенных монополя, совершающие колебания в противофазе. В акустике часто диполь представляют в виде жесткой малой по сравнению с длиной волны сферы, совершающей осциллирующие колебания в жидкости.

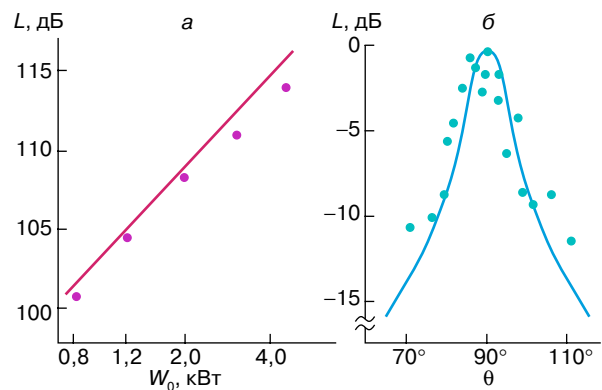
При выполнении условий  $a\lambda^{-1} \ll 1$  и  $(\mu\lambda)^{-1} \gg 1$  звук излучается в основном вдоль поверхности, так как в жидкости образуется длинный по сравнению с длиной волны звука и тонкий в поперечном направлении источник звука стержневого вида (рис. 1, в). Если  $a\lambda^{-1} \gg 1$  и  $(\mu\lambda)^{-1} \ll 1$ , излучатель имеет форму диска, диаметр которого существенно больше длины звуковой волны. Акустическое излучение рас-

пространяется в основном в направлении пучка проникающего излучения (рис. 1, г).

Все сказанное выше относится и к твердому телу, когда речь идет о продольных волнах. Однако в твердом теле кроме продольных волн могут существовать поперечные или сдвиговые волны. Они не возбуждаются проникающим излучением непосредственно, а возникают лишь вследствие отражения продольных волн от границ, например от свободных границ твердого тела.

Характеристики поля сдвиговых волн терморadiационного источника звука во многом похожи на характеристики продольных волн, но имеются и принципиальные отличия. В частности, например, сдвиговые волны в направлении, перпендикулярном границе, отсутствуют. Это обусловлено тем, что при перпендикулярном падении продольных (первичных) волн на границу раздела сдвиговые волны не возникают.

Многочисленные эксперименты, выполненные в различных лабораториях, убедительно подтвердили выводы теории. На рис. 2 приведены результаты исследований лазерной генерации звука в воде (в озере) [5]. Применялся неодимовый лазер. Частота модуляции составляла 20 кГц. Измерения проводились на расстоянии 10 м от оси терморadiационного источника звука стержневого типа. Он был удален от поверхности озера, и его ось лежала в плоскости, параллельной поверхности озера. На рис. 2, а показана зависимость уровня  $L$  звукового давления  $P$  ( $L = 20 \lg(P/P_0)$ , где  $P_0$  – некоторое начальное, наперед выбранное значение звукового давления) лазерного терморadiационного источника звука от мощности  $W_0$  лазера, а на рис. 2, б – угловая зависимость акустического поля. Точками показаны результаты экспериментов, а сплошные линии соответствуют теоретическим зависимостям.



**Рис. 2.** а – зависимость уровня звукового давления на оси терморadiационного (оптико-акустического) источника звука от мощного лазера и б – направленность при лазерном возбуждении звука в воде

Можно видеть, что экспериментальные и теоретические данные хорошо согласуются.

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ЗВУКА РАДИАЦИОННЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

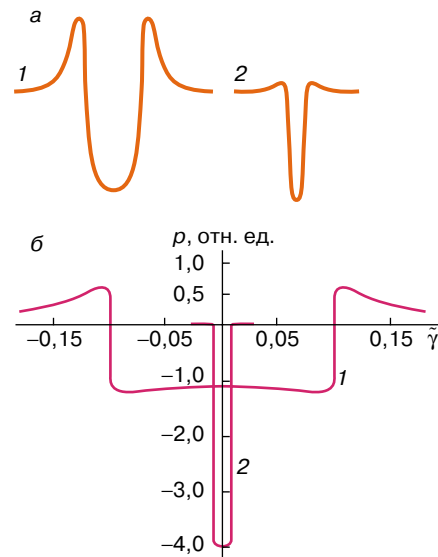
Возбуждение звука радиационными импульсами представляет особый интерес. При работе оптических квантовых генераторов или ускорителей в импульсном режиме могут быть реализованы весьма большие мощности проникающего излучения и высокая эффективность преобразования излучения в акустические сигналы весьма значительной амплитуды.

Предположим, что импульс проникающего излучения падает перпендикулярно к поверхности жидкости. Пусть  $\tau$  – длительность радиационного импульса,  $\tau_a$  – время запаздывания звука от расположенных в горизонтальном сечении области тепловых источников звука (области поглощения излучения), определяемое радиусом пучка  $a$ ,  $\tau_u$  – время запаздывания звука от расположенных в вертикальном сечении области тепловых источников звука, определяемое длиной пробега частиц  $\mu^{-1}$ . Характеристики импульсных радиационно-акустических сигналов связаны с безразмерными параметрами  $\tau/\tau_a$  и  $\tau/\tau_u$ .

В случае длинных радиационных импульсов ( $\tau \gg \tau_a, \tau_u$ ) длительность акустического сигнала определяется только величиной  $\tau$ . Амплитуда  $P$  сигнала прямо пропорциональна мощности импульса проникающего излучения подобно тому, как при терморadiационном возбуждении гармонических акустических волн. Форма акустического сигнала (огibaющая акустического импульса) оказывается универсальной и описывается второй производной огibaющей радиационного импульса  $f''(t)$ . Заметим, что  $f(t)$  характеризует зависимость интенсивности проникающего излучения от времени  $t$ .

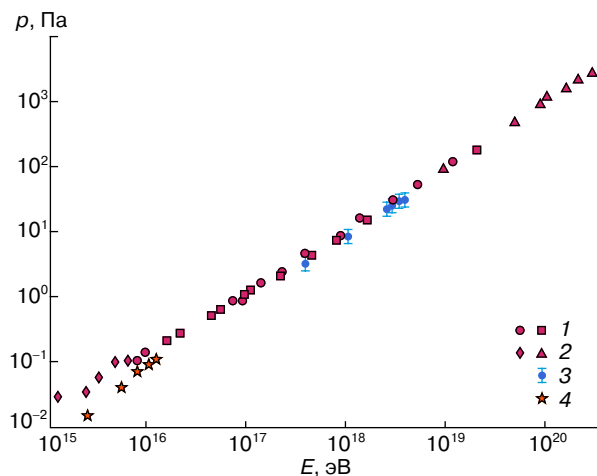
В случае коротких радиационных импульсов ( $\tau \gg \tau_a, \tau_u$ ) амплитуда акустического сигнала оказывается прямо пропорциональной энергии, а не мощности радиационного импульса. Звуковой сигнал представляет собой импульс разрежения, практически повторяющий огibaющую опрокинутого радиационного импульса  $f(t)$ . Аналогичные закономерности присущи акустическим сигналам, возбуждаемым радиационными импульсами в твердом теле.

Результаты экспериментов по генерации звука импульсами проникающего излучения в жидкостях и твердых телах убедительно подтверждают сказанное выше. Так, например, на рис. 3 показаны типичные формы сигналов, зарегистрированных в воде, при действии длинных и коротких лазерных импульсов (рис. 3, а) и соответствующие им теоретические зависимости (рис. 3, б). Последние получены в предположении, что лазерный импульс имеет прямоугольную форму. На рис. 4 приведены результаты измерений амплитуд акустических сиг-

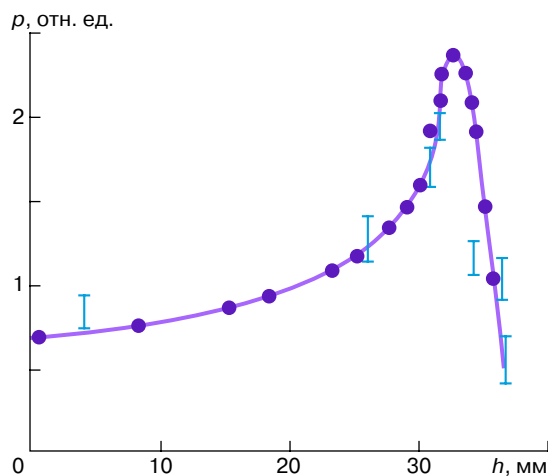


**Рис. 3.** а – звуковые импульсы, зарегистрированные экспериментально в воде при лазерном возбуждении, и б – результаты расчета в предположении, что лазерный импульс имеет прямоугольную форму. 1 – длинный и 2 – короткий лазерный импульс

налов в воде, генерируемых короткими импульсами протонных, электронных и лазерных пучков. Энергия в пучке изменялась в пределах  $10^{15} - 10^{20}$  эВ. Как и следует из теории, наблюдается линейная зависимость акустического сигнала от энергии. На рис. 5 показана зависимость амплитуды акустического сигнала, генерируемого в алюминиевой пластине импульсами протонов с начальной энергией 70 МэВ, от толщины пластины из плексигласа – поглотителя



**Рис. 4.** Зависимость амплитуды акустического сигнала от энергии импульса (энерговыведения в сбросе) для протонных (1, 2), электронных (3) и лазерных (4) пучков в воде



**Рис. 5.** Зависимость акустического сигнала, генерируемого импульсом протонного пучка в алюминиевой пластине, от толщины  $h$  плексигласового поглотителя пучка

излучения. Пластины-поглотители устанавливались на пути протонного пучка перед алюминиевой пластиной. Максимальное значение амплитуды акустического сигнала, как и следовало ожидать, соответствует пику Брэгга на кривой поглощения протонов от длины остаточного пробега в веществе.

## ГЕНЕРАЦИЯ ЗВУКА ОДИНОЧНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Механизмы генерации звука одиночными частицами в веществе весьма разнообразны и связаны с типом частиц и их энергией. Так, например, тяжелая частица при прохождении в веществе производит ионизацию, в результате которой частица теряет энергию. Наиболее вероятными первичными столкновениями с электронами атомов вещества являются такие, при которых выбивается относительно медленный вторичный электрон. Его кинетическая энергия не превышает энергии ионизации. Однако в результате небольшого числа столкновений образуются вторичные электроны с относительно большой энергией. Это так называемые  $\delta$ -электроны. В жидкости  $\delta$ -электроны образуют перегретые микрообласти, взрывообразное расширение которых вызывает ударные волны, переходящие по мере распространения в акустические волны. Ударные волны могут возбуждаться и при прохождении осколков деления. При определенных условиях в жидкости на треках частиц могут образовываться, осциллировать и схлопываться микропузырьки (пузырьковый механизм генерации звука). Суммарный акустический эффект от микропузырьков зависит как от относительного количества пузырьков, так и от эффективности генерации звука одиночным пузырьком. Оценки показывают, что существенный вклад в акустическое излучение вносят квазистабильные, а

не только схлопывающиеся микропузырьки с размерами порядка  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  см.

Обратим внимание читателя еще на один из механизмов — так называемый черенковский механизм генерации звука. Когда частица движется в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения волн в среде, то она излучает волны, называемые черенковским излучением. При движении, например, в металле заряженная частица создает вокруг себя электромагнитное поле, которое выводит из равновесия электроны проводимости. Последние благодаря связи с решеткой раскачивают ионы. Если скорость частицы больше скорости звука, то этот механизм приводит к генерации продольных и сдвиговых волн.

Особый интерес представляет генерация звука частицами сверхвысоких энергий. При взаимодействии такой частицы с веществом (например, нейтрино с энергией  $10^{15}$  эВ) возникает ядерно-электромагнитный каскад (ливень), другими словами, в веществе возникает пучок вторичных частиц: адронов, электронов и фотонов. По некоторым оценкам, параметры каскада от нейтрино с энергией порядка  $10^{15}$  эВ в воде составляют: длина  $\mu^{-1} = 4$  м и диаметр  $a = 2$  см. В жидкости образуется терморациационный излучатель звука стержневого типа. Амплитуда акустического сигнала в воде на расстоянии 100 м при наблюдении перпендикулярно оси каскада может составить  $\sim 10^{-4}$  Па. Такой сигнал может быть зарегистрирован современными гидроакустическими приемниками. Это открывает возможности акустического детектирования высокоэнергетических частиц в океане (подробнее об этом ниже). В заключение следует, конечно, заметить, что одиночные частицы генерируют слабые акустические сигналы в отличие от сигналов, возбуждаемых импульсами проникающего излучения большой мощности.

## НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ АКУСТИКИ

Исследования акустических эффектов взаимодействия проникающего излучения с веществом открывают новые возможности в исследовании самого проникающего излучения (акустическое детектирование излучения, радиационно-акустическая дозиметрия и диагностика), в изучении физических характеристик вещества, в решении задач неразрушающего контроля (растровая радиационно-акустическая микроскопия, радиационно-акустическое зондирование и визуализация неоднородностей среды), а также нетрадиционные пути направленного радиационно-акустического воздействия на физико-механическую и химическую структуру вещества. Ускорители и лазеры все шире внедряются в современную технологию. Объединение радиационной, лазерной и ультразвуковой технологий на пути использования радиационно-акустических эффектов открывает принципиально новые возможности в

решении актуальных прикладных проблем. Ниже мы приведем лишь примеры, которые относятся к неразрушающему контролю, детектированию элементарных частиц сверхвысоких энергий, а также к одному, казалось бы совершенно необычному, применению сверхмощных ускорителей новых поколений в геоакустике.

## Растровая радиационно-акустическая микроскопия

Традиционные методы исследования и визуализации микрообъектов, такие, как оптическая и электронная микроскопия, имеют ограничения. Например, оптический и растровый электронные микроскопы обладают высокой разрешающей способностью, но они непригодны для изучения внутренних областей непрозрачных материалов. При использовании растровых рентгенотелевизионных микроскопов возникают трудности, связанные с расшифровкой получаемых изображений, особенно при изучении слабоконтрастных объектов.

Отмеченные недостатки отсутствуют у растрового радиационно-акустического микроскопа (РРАМ). Принцип действия РРАМ основан на явлении генерации и распространения в объекте звуковых и тепловых волн, возбуждаемых сфокусированным пучком зондирующего модулированного по интенсивности проникающего излучения. Акустические и тепловые волны, возникающие в изучаемом объекте, регистрируются акустическим приемником. Акустический сигнал зависит от локальных физических свойств объекта. При сканировании пучка в двух взаимно ортогональных направлениях по поверхности исследуемого объекта на экране индикаторного устройства (телевизионном экране) формируется растровое радиационно-акустическое изображение. В общем случае оно является результатом трех процессов: вариации поглощаемой мощности проникающего излучения вследствие изменения от точки к точке радиационных свойств объекта, взаимодействия тепловых волн с тепловыми неоднородностями и взаимодействия акустических волн с упругими неоднородностями объекта.

Первый процесс несет сведения только о радиационно-поглощательных свойствах объекта. При доминировании этого процесса радиационно-акустическое изображение по существу идентично, например, оптическому или растровому электронному изображению. Второй процесс характеризуется взаимодействием тепловых волн с микронеподнородностями. Он дает качественно новую информацию и открывает возможности существенно расширить представления о физических свойствах объекта. Третий процесс позволяет получить данные о механических нерегулярностях объекта и играет существенную роль, если длина акустической волны того же порядка, что и размеры микронеподнородности (обычно это происходит на частотах модуляции ин-

тенсивности проникающего излучения, превышающих 100 МГц). В этом случае радиационно-акустическое изображение идентично акустическому (как в акустическом микроскопе).

В настоящее время уже разработаны и применяются на практике или разрабатываются растровые лазерно-акустические, растровые рентгеноакустические и растровые ионно-акустические микроскопы.

## Акустическое детектирование частиц сверхвысоких энергий в космических лучах. Проект DUMAND

Областью сверхвысоких энергий в космических лучах принято считать энергии выше  $10^{12}$  эВ. Большой интерес представляет нейтринное излучение, что обусловлено прежде всего колоссальной проникающей способностью нейтрино. Появляются реальные возможности заглянуть в глубь звездных недр. Это особенно относится к исследованиям при энергиях  $E > 10^{12}$  эВ, при которых нейтрино могут принести информацию о процессах высокой энергии, происходивших в эпоху с большими красными смещениями, об уникальных физических объектах — скрытых источниках.

Появление в спектре космических лучей частиц сверхвысоких энергий исключительно редкое событие. Последнее заставляет создавать для их регистрации установки огромных размеров — площадью в несколько десятков квадратных километров. Впервые идея о возможности регистрации космических нейтрино была выдвинута академиком М.А. Марковым (СССР) в 1960 году. Новый этап в развитии нейтринной астрономии высокой энергии начался в связи с обсуждением проекта глубоководного эксперимента DUMAND (Deep Underwater Muon And Neutrino Detection). Первоначально в рамках проекта предполагали создать пространственную решетку фотоприемников, погруженных на глубину около 5 км в океане. Объем решетки около кубического километра. Слой воды над установкой служит защитой (экраном) от фона мюонов космических лучей. Г. Аскарьян, И. Долгошеин (СССР) и независимо Р. Боуэн (США) предложили акустический метод регистрации нейтрино сверхвысоких энергий ( $E > 10^{17}$  эВ) с помощью пространственной решетки гидрофонов. Суть метода состоит в следующем. Ядерно-электромагнитный каскад, порожденный взаимодействием нейтрино с веществом (водой), сопровождается быстрым (практически мгновенным) нагреванием узкого канала оси ливня каскада. Это вызывает расширение объема жидкости и приводит к возникновению акустического импульса давления (терморadiационный механизм генерации звука). Импульс давления регистрируется решеткой гидрофонов. Акустический детектор-решетка может оказаться экономически более оправданным, так как требует значительно меньшего количества элементов-гидрофонов, нежели оптический, содержащий

огромное число фотоприемников. Дело в том, что звук в океане (воде) распространяется на большие расстояния, а свет быстро затухает.

### Нейтрино для геоакустики. Проект GENIUS

Речь идет о геофизическом применении пучков нейтрино, которые можно будет создавать с помощью сверхмощных ускорителей будущих поколений. Авторы проекта GENIUS (Geological Exploration Neutrino Induced Underwater Sound) назвали такой ускоритель геотроном. Пучок нейтрино, сформированный на ускорителе, нацеливается в заданном направлении и проходит значительное расстояние в Земле. По мере распространения пучок генерирует акустическое излучение, поскольку образует огромный терморadiационный акустический излучатель. Оценки показывают, что пучок нейтрино, созданный протонным кольцевым ускорителем (геотроном) на энергии  $10 \text{ ТэВ} = 10^{13} \text{ эВ}$  на дистанции  $L = 1000 \text{ км}$  от геотрона на глубине  $10 \text{ км}$  в Земле, должен иметь диаметр около  $20 \text{ м}$  и генерировать акустические импульсы с амплитудой  $10^{-3} \text{ Па}$  в полосе частот около  $90 \text{ Гц}$  с центральной частотой  $100 \text{ Гц}$ . Такие импульсы могут быть зарегистрированы решеткой акустических приемников на поверхности Земли — геофонов или гидрофонов в воде. Фиксируя изменения акустического сигнала вдоль трассы пучка можно получить информацию о типе пород и полезных ископаемых на довольно больших глубинах в Земле.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже мы остановились главным образом на терморadiационной генерации звука проникающим излучением, когда объемная плотность энергии, выделяющейся при его поглощении в веществе, невелика. Между тем широкие перспективы создания новых радиационно-акустических технологий могут открыть исследования нелинейных радиационно-акустических эффектов, когда возникают мощ-

ные ударные волны. Под действием этих ударных волн могут изменяться физические и химические свойства вещества, что может быть использовано в новых технологиях. Источники радиации огромной мощности уже разработаны или разрабатываются для применения в пучковом оружии, как об этом свидетельствует, например, обзор американских физиков [6]. Будем надеяться, что эти источники никогда не будут использованы по прямому назначению, а найдут применение в мирных целях, в том числе в радиационно-акустических технологиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bell A.G. Upon the Production of Sound by Radiant Energy // Philos. Mag. 1981. Vol. 11, № 71. P. 510–528.
2. Glaser D.A., Rahm D.C. Characteristics of Bubble Chambers // Phys. Rev. 1955. Vol. 97, № 2. P. 474–479.
3. Аскарьян Г.А. Гидродинамическое излучение ионизирующих частиц в стабильных жидкостях // Атом. энергия. 1957. Т. 3, № 8. С. 152–153.
4. White R.M. Generation of Elastic Wave by Transient Surface Heating // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34, № 12. P. 3559–3567.
5. Лямшев Л.М. Радиационная акустика. М.: Наука–Физматлит, 1996. 304 с.
6. Доклад Американскому физическому обществу экспертной группы о научных и технических аспектах пучкового оружия // Успехи физ. наук. 1988. Т. 155, № 4. С. 559–679.

\* \* \*

Леонид Михайлович Лямшев, доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института, зав. отделом Акустического института им. Н.Н. Андреева РАН, лауреат Государственной премии СССР, действительный член Российской академии естественных наук. Область научных интересов – акустика, гидрофизика, волновые процессы и нелинейная динамика. Автор трех монографий, 20 монографических обзоров и свыше 300 научных статей.