

УДК 534.2

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ НА ПРИНЦИПАХ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ

© 2025 г. И. Б. Есипов<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Москва, Россия

<sup>b</sup>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

\*e-mail: igor.esipov@mail.ru

Поступила в редакцию 05.09.2024 г.

После доработки 05.09.2024 г.

Принята к публикации 24.12.2024 г.

Приводится краткий обзор исследований акустического сигнала параметрической антенны в океане на мегаметровых дистанциях. Обсуждаются также особенности распространения широкополосного сигнала параметрической антенны в мелководном морском волноводе. В этом случае частотная дисперсия скорости распространения звука в морском волноводе позволяет обеспечить компрессию широкополосного одномодового сигнала. Такая компрессия приводит к росту эффективности зондирования морской среды. Обсуждается возможность ветвистого распространения направленного акустического излучения в неоднородном океане. Показано, что нелинейная акустика открывает новые, не реализуемые известными методами, возможности для применения гидроакустических антенн при дальнем распространении сигнала в неоднородной морской среде.

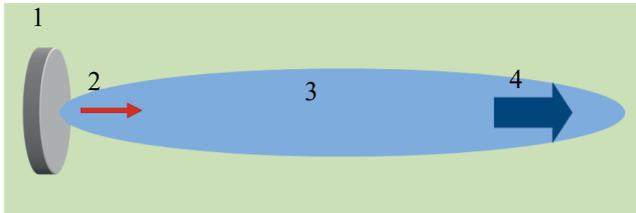
**Ключевые слова:** параметрическая антенна, частотная дисперсия волновода, ветвистое распространение сигнала

**DOI:** 10.31857/S0320791925010013, **EDN:** BRCNTZ

### ВВЕДЕНИЕ

В этом году мы отмечаем 100 лет со дня рождения выдающегося физика, специалиста в области радиопизики и акустики Виталия Анатольевича Зверева. Виталий Анатольевич всегда интересовался возможностью практического использования новых физических явлений, в частности эффективностью применения нелинейных акустических методов в гидроакустике [1]. Им впервые в нашей стране были определены принципы работы параметрической антенны. Параметрическая антенна (ПА) формируется в среде при коллинеарном взаимодействии интенсивных звуковых волн, так называемой накачки (рис. 1). ПА достаточно известна как инструмент для профилирования донных структур. Особенностью ПА является чрезвычайно узкая диаграмма направленности (обычно несколько градусов углового разрешения) для низкочастотных сигналов [2, 3]. Эффективная ширина диаграммы остается постоянной в широком диапазоне частот. ПА отличается от обычных антенн с сопоставимыми характеристиками направленности относительно небольшими размерами,

широкой частотной полосой излучаемого сигнала (это может быть более октавы) и острой характеристикой направленности (как правило, единицы градусов) во всем частотном диапазоне. Практика применения ПА показывает, что она обеспечивает одномодовое возбуждение подводного звукового канала [4]. Расширение полосы акустических сигналов приводит к повышению пространственного разрешения исследований, улучшению качества передачи информации и подводной связи, открывает возможность применения новых подходов в гидрофизических исследованиях, в частности акустической томографии морских акваторий. Л.М. Бреховских отмечал, что акустические характеристики ПА делают ее “идеальным инструментом для акустики океана” [5]. Однако, с появлением параметрических антенн возникла дискуссия о возможности их конкуренции с традиционными гидроакустическими инструментами. Характер такой дискуссии частично отражен в [6]. В частности, там отмечено, что в ситуациях с существенной реверберацией акустического сигнала узкий луч и отсутствие боковых лепестков могут более



**Рис. 1.** Схема формирования сигнала параметрической антенной: 1 — излучатель высокочастотной накачки, 2 — излучение высокочастотной накачки, модулированной по интенсивности, 3 — область нелинейного акустического взаимодействия, 4 — низкочастотный сигнал параметрического излучения.

чем возмещать низкие уровни параметрического источника. И там же указывается, что можно использовать более широкую полосу для улучшения соотношения сигнал/шум с помощью широкополосной обработки сигнала. В настоящей работе развивается идея применения широкополосных акустических сигналов в задачах волноводного распространения направленного параметрического излучения.

Цель этой работы — обсудить новые возможности гидроакустической антенны, действующей на принципах нелинейной акустики для гидрофизических исследований на протяженных трассах в случайно неоднородной среде.

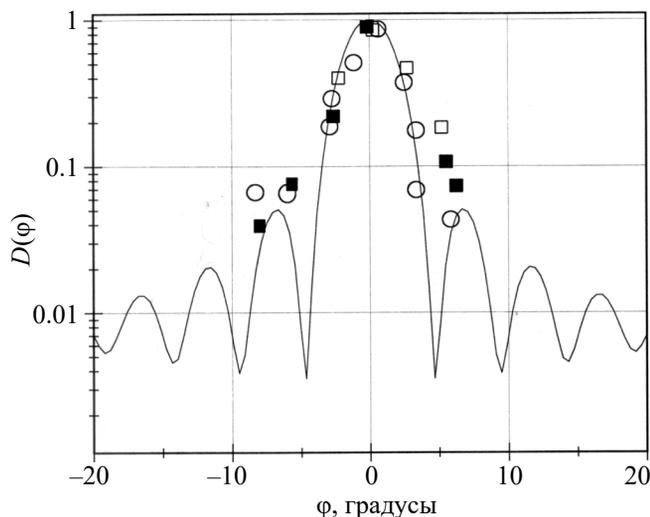
## ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Гидрофизические исследования на протяженных трассах требуют применения низкочастотных акустических сигналов, которые распространяются на значительные дистанции без существенного затухания. В этой связи всегда обсуждаются сравнительные возможности параметрической антенны и обычных излучателей звука. Наиболее часто при этом возникает следующий вопрос: можно ли компенсировать низкую энергетическую эффективность параметрической антенны остротой ее диаграммы направленности и шириной частотной полосы излучаемых сигналов?

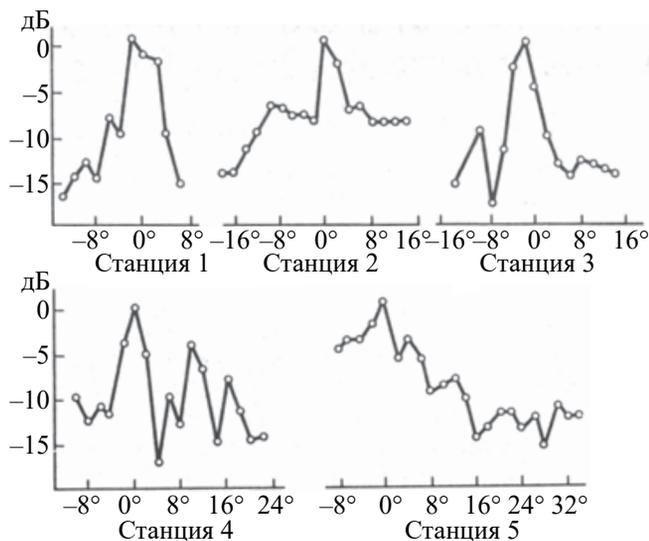
Для ответа на этот вопрос обратимся сначала к истории. Первые и единственные в истории опыты по дальнему распространению параметрического излучения в океане были выполнены в 1989–1990 гг. сотрудниками Акустического института и Института прикладной физики РАН. В этих исследованиях участие принимал и ближайший коллега В.А. Зверева А.И. Калачев. К тому времени, как пишет В.А. Зверев в своей работе [7], «...мы поняли, что параметрический излучатель может быть эффективным на больших расстояниях в среде, слабо поглощающей исходное излучение». Развитие представлений о возможностях применения параметрических антенн для изучения океана

позволило в конце 1980-х годов поставить ряд океанических исследований возбуждения и распространения параметрического излучения при различных гидрологических условиях.

Опыты были поставлены на научно-исследовательских судах «Академик Борис Константинов» (АБК) и «Академик Николай Андреев» (АНА). В качестве параметрической антенны использовалась установленная в носовом обтекателе судна (АБК) акустическая система бокового обзора. Излучающая антенна имела 6 м в длину и 2 м в ширину и возбуждала в океане излучение накачки мощностью 20 кВт на частоте около 3 кГц, которое эффективно распространялось в океане на расстояние около 30 км. Эти данные и определили характеристики параметрического излучения на частоте огибающей накачки. Частотный диапазон параметрического излучения в этих опытах составлял от 230 до 700 Гц. Сначала было установлено, что с помощью такого параметрического излучателя можно получать низкочастотное акустическое поле, распространяющееся на десятки километров в сложных условиях Баренцева моря [8]. При этом было показано, что на больших расстояниях уровень параметрического излучения превосходит уровень излучения накачки. Это обстоятельство позволило по-новому оценить возможности параметрических излучателей для исследований распространения звука на протяженных трассах в океане. В 1990 г. совместно с Институтом прикладной физики АН СССР были поставлены эксперименты в ходе одного из последних рейсов этих научно-исследовательских судов в Тихом океане. В этом случае опыты проходили в условиях глубокого океана, где направленное акустическое излучение распространяется по циклическим лучам, осциллирующим между глубинными слоями океана и поверхностью. Прием сигналов осуществляли с борта АНА. На первом этапе таких экспериментов циклический характер распространения сигнала в волноводе затруднял обнаружение поля параметрического излучения на небольшом расстоянии, поскольку длина такого цикла оказалась около 40 км. В силу высокой направленности излучения требовалось точное маневрирование излучающего и приемного судов для измерения поля параметрической антенны. Однако по мере расхождения излучающего и приемного НИС на большие дистанции, оказалось, что условия регистрации параметрического излучения упрощаются. На расстояниях в несколько сот километров сигнал уже удалось зарегистрировать достаточно устойчиво. На дистанции в 1000 км акустический сигнал в полосе частот 230–700 Гц был зарегистрирован с превышением над уровнем шумов более чем в 20 дБ [9]. Сравнительный опыт показал, что обычный монополюсный источник той же мощности смог показать сравнимую эффективность излучения на этой

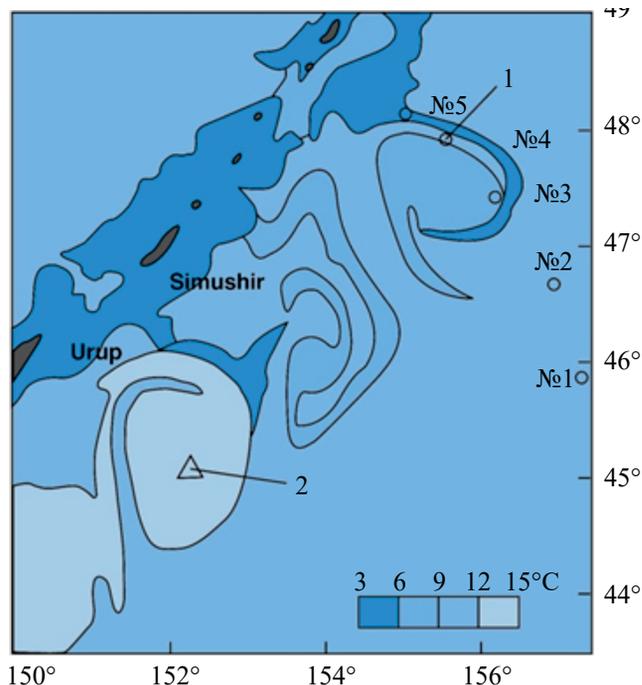


**Рис. 2.** Диаграмма направленности параметрической антенны в океане. □ — частота 230 Гц, дистанция 200 км; ○ — частота 400 Гц, дистанция 200 км, ■ — частота 230 Гц, дистанция 1000 км.



**Рис. 4.** Угловые характеристики акустических сигналов, прошедшие через вихрь по трассам, согласно станциям НИС АБК на рис. 3.

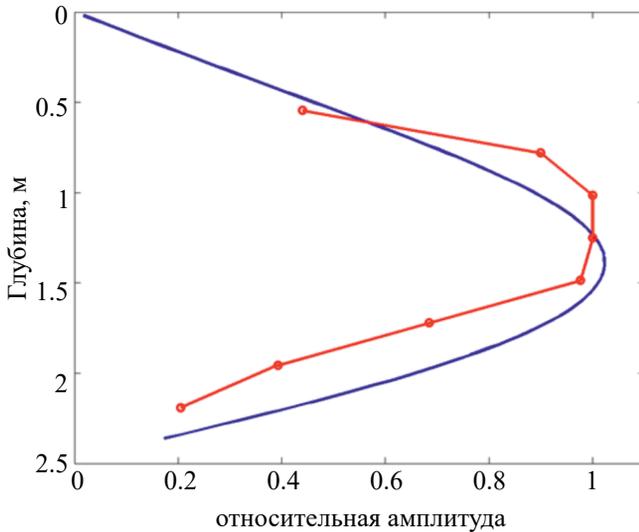
дистанции, но в существенно более узкой полосе частот только при погружении его на ось подводного звукового канала. Заметим, что излучающая антенна, работающая в параметрическом режиме, находилась у поверхности океана в носовом обтекателе НИС, т.е. в весьма неблагоприятных для дальнего распространения условиях. При этом дальность действия этой акустической системы на ее основной частоте 3 кГц, которая использовалась в качестве накачки, была превышена в несколько десятков раз.



**Рис. 3.** Карта температуры поверхности океана в районе эксперимента. 1 и 2 — положения НИС АБК и НИС АНА соответственно. НИС АБК проходит последовательно станции от № 1 до № 5.

На рис. 2 приведены экспериментальные результаты измерения направленности параметрического излучения при дальнем распространении в океане. На этом рисунке видно, что диаграмма направленности практически не меняется с изменением частоты сигнала в широком диапазоне. При этом ширина основного лепестка параметрического излучения оказывается достаточно узкой, около  $6^\circ$ , что уже направленности излучающей антенны на частоте накачки 3 кГц и соответствует квадрату диаграммы на частоте накачки.

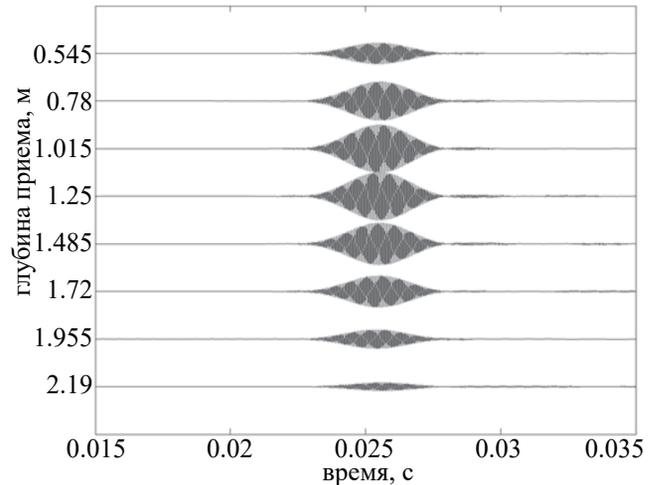
В ходе той экспедиции был выполнен уникальный опыт по зондированию направленным параметрическим излучением синоптического вихря в океане на дистанции 400 км [10]. Этот опыт был поставлен в районе Курильского течения, где типично образование океанических вихрей. Было получено спутниковое изображение акватории с синоптическим вихрем, которое позволило составить схему маневрирования исследовательских судов в ходе этого эксперимента (рис. 3). В результате было экспериментально показано, что океанический вихрь существенным образом менял условия распространения направленного акустического излучения в океане, в диаграмме направленности параметрического излучения появились новые дополнительные максимумы (рис. 4), которые не наблюдались при измерениях в невозмущенной среде (рис. 2).



**Рис. 5.** Вертикальное распределение относительной амплитуды импульсов (красная) для частоты 15 кГц и 1-я мода собственной функции волновода (голубая) для экспериментального профиля звука и скорости звука в дне (продольной) 1600 м/с, плотность грунта 1700 кг/м<sup>3</sup>.

Этот цикл исследований показал, что направленное параметрическое излучение хорошо захватывается океаническим волноводом и устойчиво в нем распространяется. Поэтому, позднее, были поставлены опыты, в которых исследовались особенности волноводного распространения параметрического излучения в условиях мелкого моря [11, 12]. Эти исследования были выполнены в мелководном Азовском море, где глубина не превышала 2.5 м при дистанции распространения сигнала до 5.5 км, т.е. дальность распространения сигнала превышала толщину волновода в 2000 раз. В этих условиях было обнаружено возбуждение нижней моды волновода (рис. 5), наименее чувствительной к влиянию дна и поверхности на условия распространения. Эта мода волновода была возбуждена широкополосным сигналом в полосе от 5 до 15 кГц, продемонстрирована возможность компрессии такого широкополосного сигнала при распространении в мелководном волноводе (рис. 6). Известные гидроакустические методы не позволяют селективно возбуждать моды в морском волноводе в столь широкой полосе частот. Заметим, что вопросы, касающиеся особенностей распространения параметрического излучения в морском волноводе, обсуждались и ранее, что отражено, например, в работах [13, 14].

Таким образом, этот и предыдущие опыты показывают, что применение параметрического излучателя для исследования океана приводит к качественно новым результатам, которые трудно получить с помощью обычных методов гидроакустики, поэтому вопрос о сравнительной эффективности параметрических излучателей при сопоставлении



**Рис. 6.** Сигналы на вертикальной цепочке приемников, расстояние 1000 м. Частота 15 кГц (полоса фильтра 500 Гц), длительность импульса 2 мс.

с обычными антеннами оказывается непросто. Применение параметрических антенн качественно меняет результаты эксперимента.

#### ЧАСТОТНАЯ ДИСПЕРСИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИГНАЛА В МОРСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Морской волновод обладает частотной дисперсией скорости распространения акустического сигнала. Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и от толщины волновода. Частотная дисперсия приводит либо к разрушению коротких широкополосных импульсов, которые распространяются на достаточно протяженные расстояния, либо к концентрации энергии акустического сигнала в коротком интервале времени, если частотная модуляция сигнала соответствует условиям дисперсии в среде. В таком случае можно говорить о том, что происходит фокусировка или сжатие акустического сигнала во времени [12].

Условия распространения в мелководном волноводе в нашем случае соответствуют нормальной волноводной дисперсии, когда групповая скорость распространения сигнала увеличивается с частотой. Следовательно, для достижения эффекта сжатия широкополосного сигнала при его распространении в волноводе нужно обеспечивать возрастание частоты за время излучения сигнала.

Предельное сжатие сигнала  $\tau$  определяется эффективной частотной полосой его спектра  $\Delta f$ ,  $\tau = (\Delta f)^{-1}$ . С другой стороны, длительность излучаемого импульса  $T$  при условии его полного сжатия на дистанции  $L$  будет определяться частотной дисперсией  $\partial c / \partial f$  скорости распространения звуковой волны  $c$ :

$$T = L \frac{\partial c / \partial f}{c^2} \Delta f. \quad (1)$$

Тогда при сжатии сигнала в результате волновой дисперсии возможно увеличение его интенсивности в отношении  $T / \tau$  раз:

$$T / \tau = L \frac{\partial c / \partial f}{c^2} \Delta f^2. \quad (2)$$

Таким образом, эффект увеличения интенсивности пропорционален дистанции, на которую распространяется сигнал, величине волновой дисперсии и квадрату частотной полосы сигнала. При этом увеличивается соотношение между сигналом и шумом, который накапливается в регистрирующей аппаратуре за время приема сигнала  $t$ .

Заметим, что групповая скорость распространения сигнала в волноводе определяется параметрами волновода. В частности, для волновода Пекериса с постоянной, независимой от глубины скоростью распространения звука  $c_0$ , частотная зависимость скорости распространения сигнала определяется соотношением:

$$c = c_0 \left[ 1 - \frac{c_0^2 n^2}{(2fH)^2} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $H$  — вертикальный масштаб волновода,  $n$  — номер моды. Отсюда получаем предельную оценку частотной дисперсии скорости звука в волноводе  $\partial c / \partial f \approx f^{-2}$ . При излучении сигнала с постоянной относительной частотной полосой  $\Delta f / f = \text{const}$  оказывается, что относительное сжатие сигнала  $T / \tau$  увеличивается с увеличением дистанции распространения сигнала  $L$ . Поэтому наиболее заметный эффект относительного увеличения интенсивности широкополосного сигнала можно получить при волноводном распространении на протяженных трассах.

Таким образом, длительность частотно модулированного сигнала в процессе его распространения в волноводе уменьшается с расстоянием  $T(r) = T_0 - \Delta T$ , где  $T_0$  — начальная длительность сигнала. Изменение длительности связано согласно выражению (1) с величиной частотной дисперсии в волноводе  $\partial c / \partial f$  и пройденной дистанцией  $r$ . Поэтому

$$\Delta T = rc^{-2} \frac{\partial c}{\partial f} \Delta f. \quad (4)$$

Далее, используя закон сохранения энергии, можно получить выражение для интенсивности сигнала при его распространении в волноводе. Имея в виду, что точность определения длительности сигнала  $\tau = (\Delta f)^{-1}$  связана с его частотной полосой  $\Delta f$ , получим выражение для зависимости интенсивности сигнала  $I(r)$  от пройденного расстояния

$$I(r) = I_0 \left( \frac{R}{r} \right) \left( \frac{T_0}{T + \tau} \right) = I_0 \left( \frac{R}{r} \right) \left( \frac{1}{1 - r / L + \tau / T_0} \right), \quad (4)$$

здесь  $R$  — пространственный масштаб, характерный для волноводного распространения,  $L$  — дистанция максимального сжатия сигнала,  $I_0$  — начальная интенсивность сигнала при входе в волновод.

Для широкополосного сигнала  $\tau / T_0 \ll 1$  и относительная интенсивность  $I(r) / I_0$  достигает максимума при  $r = L$  (рис. 7). Величина максимума отношения  $I(r) / I_0$  зависит от дисперсионных свойств волновода и квадрата частотной полосы сигнала. Это отношение, согласно выражениям (2), (4), можно определить как:

$$\frac{I_{\max}}{I_0} = \left( \frac{R}{L} \right) \frac{T_0}{\tau} = Rc^{-2} \frac{\partial c}{\partial f} \Delta f^2. \quad (5)$$

Отношение  $I_{\max} / I_0$  быстро возрастает с увеличением частотной полосы сигнала и может достигать 1 или даже более того при октавной полосе сигнала. В работе [12] показано, что в условиях черноморского волновода при распространении одномодового сигнала в полосе частот от 200 до 1200 Гц на дистанции в 500 км длительность сигнала может измениться от 80 до 5 мс, т.е. в 16 раз.

На рис. 7 показано относительное изменение интенсивности частотно модулированного сигнала в сравнении с типичными примерами сферического распространения сигнала в однородной среде или цилиндрического распространения в идеальном волноводе. Видно, что интенсивность частотно модулированного сигнала достигает максимума, образуя своеобразный акустический барьер. За этим барьером происходит быстрый спад

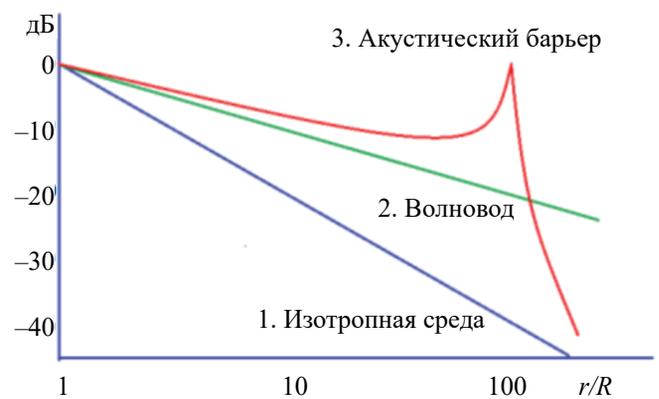


Рис. 7. Зависимость интенсивности сигнала от расстояния. 1 — Изотропная среда  $I(r) = I_0(R/r)^2$ ; 2 — волноводное распространение  $I(r) = I_0(R/r)$ ; 3 — частотная дисперсия  $I(r) = I_0(R/r)T_0/(T+\tau)$ .

интенсивности сигнала, поскольку его длительность начинает быстро увеличиваться в результате частотной дисперсии.

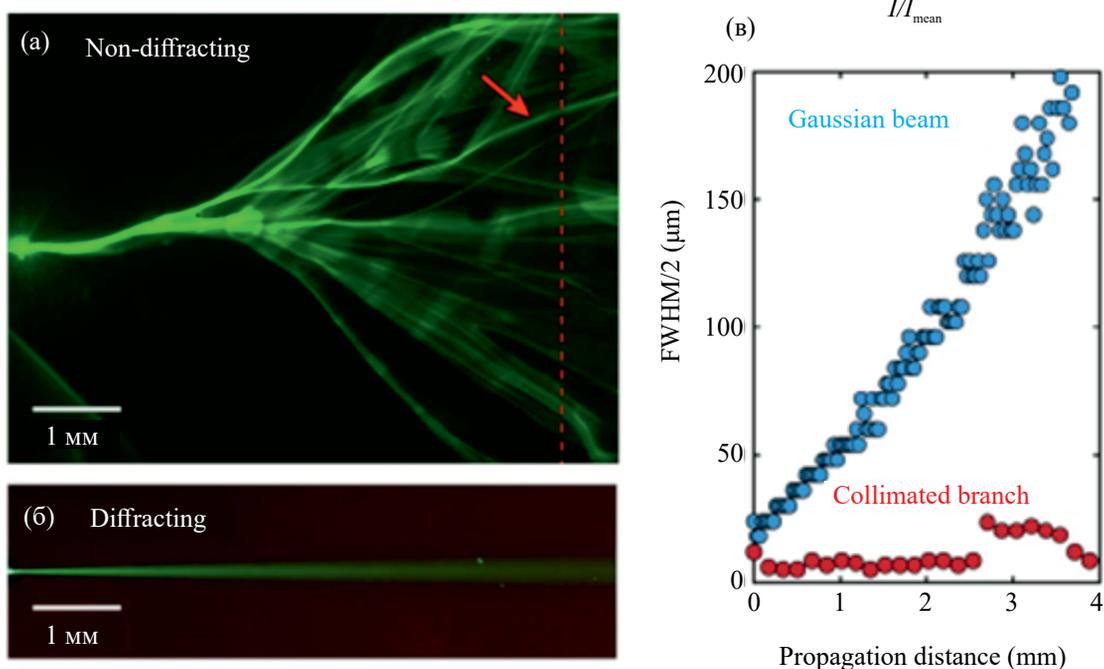
### ВЕТВИСТОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Эксперименты показывают удивительную стабильность акустических сигналов при распространении на мегаметровые расстояния в подводном звуковом канале в океане, несмотря на случайные изменения скорости звука [15]. При распространении на достаточно большие расстояния возникающее многократное рассеяние должно эффективно усреднять флуктуации акустического сигнала.

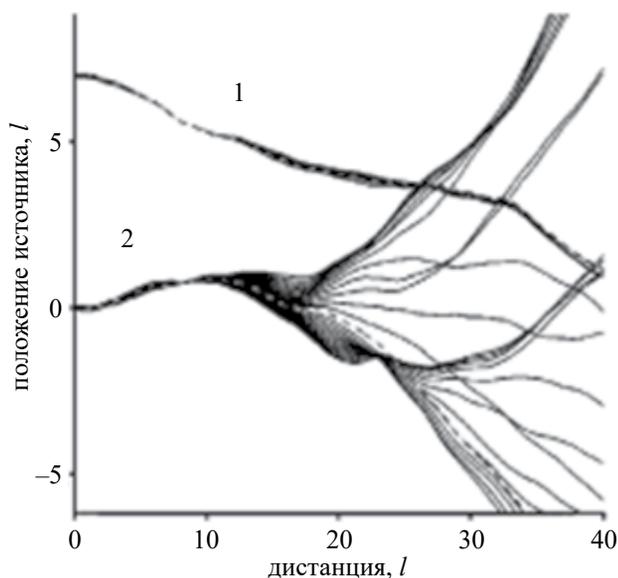
Недавно была опубликована статья [16], в которой демонстрируются особенности распространения лазерного луча в неоднородной мыльной пленке. В ней приведены эксперименты, демонстрирующие ветвистое распространение света в неоднородной среде, где линейный масштаб неоднородности существенно больше длины волны распространяющегося излучения, но существенно меньше дистанции, на которую это излучение распространяется. Рис. 8 наглядно демонстрирует, что на расстоянии более миллиметра в условиях этого опыта лазерный луч начинает ветвиться, он делится на несколько лучей, которые далее распространяются независимо. Но удивительной

особенностью ветвистого распространения луча является показанное на этом рисунке отсутствие дифракции. Рис. 8в демонстрирует распространение этого луча в однородной среде. Там в результате дифракции луч расширяется. В неоднородной среде, в результате рассеяния на неоднородности вперед, рассеянное поле компенсирует дифракционную расходимость, и волновой пучок сохраняет площадь поперечного сечения при своем распространении. Как следует из графика на рис. 8в, на дистанции 3–4 мм такой коллимированный луч может быть на порядок уже луча, распространяющегося в однородной среде.

Особенности ветвистого распространения в неоднородной среде направленного пучка излучения не были обойдены вниманием и акустиков. Авторы работы [17], теоретически исследуя существование перемежающейся динамики в общей задаче акустики океана на больших расстояниях, рассматривают распространение направленного пучка лучей через двумерный ландшафт меняющегося потенциального поля, которое моделирует поле внутренних волн в океане. Одним из результатов этой работы является демонстрация ветвистого распространения (рис. 9), характер которого очень похож на то, что показано на рис. 8 для лазерного луча в неоднородной пленке. Характер дифракции волнового пучка здесь не рассматривался, поскольку авторы в своем исследовании использовали лучевую



**Рис. 8.** Типичный вид ветвистого распространения в неоднородной среде [16]: (а) — иллюстрирует ограничение дифракции в каналах распространения сигнала, (б) — экспериментальное наблюдение дифракционного расширения гауссова пучка того же размера, что и в эксперименте (а), но в однородной среде, (в) — сравнение ширины пучка в канале, помеченном стрелкой на (а) с дифракционной шириной пучка в однородной среде на (б).



**Рис. 9.** Модель распространения звука в неоднородном океане [17]. 1 — Стабильный пучок, выходящий из источника, расположенного в минимуме скорости звука. 2 — Нестабильный, ветвящийся пучок.  $l$  — пространственный масштаб неоднородности.

программу. Однако они обратили внимание на корреляцию неоднородностей в поле внутренних волн в океане, что приводит к возможности стабилизации пучка лучей, выходящих из одной точки. Как следует из рис. 9, если направленный пучок лучей выходит из точки в области минимума неоднородного потенциала, то такой пучок сохраняет свою стабильность на масштабах, существенно превосходящих масштаб неоднородности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможности параметрических антенн возбуждать направленное акустическое излучение в однородной среде достаточно изучены. Познакомиться с методиками расчета и условиями выбора оптимальных характеристик можно, например, в работе [18]. Установлено, что роль нелинейных методов в акустике возрастает при дальнем распространении низкочастотных сигналов. Вместе с этим, как показывает опыт, в условиях морского подводного волновода эффективность направленного широкополосного излучения параметрической антенны может быть сравнимой и даже превосходить эффективность обычных гидроакустических источников при возбуждении волновода в широкой полосе частот. Имеется уникальный опыт передачи сигнала в октавной полосе частот в Тихом океане на дистанцию 1000 км. Показана возможность компрессии широкополосного одномодового сигнала в подводном акустическом канале за счет волноводной дисперсии. При этом в результате

компрессии интенсивность сигнала в морском волноводе может увеличиваться в несколько десятков раз. Величина сжатия сигнала определяется шириной его спектра, дистанцией распространения и гидрологическими условиями волновода.

Показано, что при распространении направленного излучения в неоднородной среде возникает его ветвление. При этом в каждой из ветвей, в результате рассеяния на неоднородностях вперед, пропадает дифракция, происходит, по существу, одномерное распространение. Этот эффект также должен приводить к относительному росту интенсивности сигнала.

Здесь важно отметить, что как компрессия широкополосного акустического сигнала в морском волноводе, так и ветвистое распространение — это линейные эффекты, и формально параметрическая антенна никакие дополнительные качества не придает их проявлению. Однако сама реализация этих эффектов оказывается возможной, прежде всего, с помощью параметрической антенны. Направленное излучение параметрической антенны позволяет возбудить основную моду морского волновода в полосе частот более октавы. Получить подобный результат известными линейными методами пока не удастся. Похожее заключение можно сделать и в отношении ветвистого распространения. Как следует из приведенного опыта, ветвистое распространение наглядно реализуется с помощью хорошо направленного излучения. В условиях океана ветвистое распространение может быть реализовано на мегаметровых дистанциях. Эффективно распространяться на такие расстояния может только достаточно низкочастотный сигнал. А для направленного излучения низкочастотного сигнала необходимы антенны большой апертуры. Возможно, приведенные здесь результаты на рис. 4 свидетельствуют о реализации ветвистого распространения направленного сигнала параметрической антенны в условиях морского волновода, сильно возмущенного циклоном.

Продолжая начатую В.А. Зверевым дискуссию об эффективности параметрической антенны, приходим к заключению, что не следует сводить эту дискуссию к сравнительным расчетам эффективности параметрической и обычной антенны в тех или иных условиях. Есть примеры, в которых нелинейная акустика открывает новые, не реализуемые известными методами, возможности для применения гидроакустических антенн при дальнем распространении сигнала в неоднородном волноводе или мелкой воде.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В.А., Калачев А.И., Степанов Н.С. К вопросу об использовании нелинейных эффектов в гидроакустике // Акуст. журн. 1967. Т. 13. № 3. С. 380–382.

2. Навиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981.
3. Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М.: Наука, 1990.
4. Есипов И.Б., Попов О.Е., Воронин В.А., Тарасов С.П. Дисперсия сигнала параметрической антенны в мелком море // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 1. С. 56–61.
5. Бреховских Л.М. Океан и человек: Настоящее и будущее. М.: Наука, 1987.
6. Мьюир Т.Дж., Голдсбери Т.Дж. Вопросы обработки сигналов в нелинейной акустике // Подводная акустика и обработка сигналов. Под ред. Бьерно Л. М.: Мир, 1985. 488 с. Muir T.G., Goldsberry T.G. Approaches to signal processing in nonlinear acoustics / in Underwater Acoustics and Signal Processing. Proc. of the NATO advanced study institute. Ed. by Leif Vjorno. Denmark, 1980.
7. Зверев В.А. Как зарождалась идея параметрической акустической антенны // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 5. С. 685–692.
8. Донской Д.М., Зайцев В.Ю., Наугольных К.А., Сутин А.М. Экспериментальные исследования поля мощного параметрического излучателя в мелком море // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 2. С. 266–274.
9. Есипов И.Б., Калачев А.И., Соколов А.Д., Сутин А.М., Шаронов Г.А. Исследования дальнего распространения сигналов мощного параметрического излучателя // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 1. С. 71–75.
10. Есипов И.Б., Зименков С.В., Калачев А.И., Назаров В.Е. Зондирование океанического вихря направленным параметрическим излучением // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 1. С. 173–176.
11. Есипов И.Б., Попов О.Е., Воронин В.А., Тарасов С.П. Дисперсия сигнала параметрической антенны в мелком море // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 1. С. 56–61.
12. Есипов И.Б., Попов О.Е., Солдатов Г.В. Компрессия сигнала параметрической антенны в мелководном волноводе // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 4. С. 490–498.
13. Гурбатов С.Н., Зайцев В.Ю., Прончатов-Рубцов Н.В. О нелинейной генерации низкочастотного звука в рефракционном акустическом волноводе // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 4. С. 620–625.
14. Зайцев В.Ю., Островский Л.А., Сутин А.М. Модовая структура поля параметрического излучателя в акустическом волноводе // Акуст. журн. 1987. Т. 33. № 1. С. 37–42.
15. Colosi J.A., Baggeroer A.B., Birdsall T.G., Clark C., Cornuelle B.D., Costa D., Dushaw B.D., Dzieciuch M., Forbes A.M.G., Howe B.M., Menemenlis D., Mercer J.A., Metzger K., Munk W., Spindel R.C., Worcester P.F., and Wunsch C. A review of recent results on ocean acoustic wave propagation in random media: Basin scales. IEEE J. Ocean Eng. 1999. V. 24. P. 138–155.
16. Patsyk A., Sivan U., Segev M. et al. Observation of branched flow of light // Nature. 2020. V. 583. P. 60–65. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2376-8>
17. Wolfson M.A. and Tomsovic S. On the stability of long-range sound propagation through a structured ocean // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 109(6). P. 2693–2703.
18. Moffett M.B. and Mellen R.H. Model for parametric acoustic source // J. Acoust. Soc. Am. 1977. V. 61. No 2. P. 325–337.

## Development of Acoustic Sounding Methods of Inhomogeneous Marine Environment Based on Nonlinear Acoustics Principles

I. B. Esipov<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>*N.N. Andreev Acoustics Institute, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: igor.esipov@mail.ru*

A brief review of the studies of the acoustic signal of a parametric antenna in the ocean at megameter distances is given. The features of the propagation of a broadband signal of a parametric antenna in a shallow-water marine waveguide are also discussed. In this case, the frequency dispersion of the sound velocity in the marine waveguide allows for the compression of a broadband single-mode signal. Such compression leads to an increase in the efficiency of marine environment sounding. The possibility of branching propagation of directional acoustic radiation in an inhomogeneous ocean is discussed. It is shown that nonlinear acoustics opens up new possibilities, not implemented by known methods, for the use of hydroacoustic antennas in long-range signal propagation in a heterogeneous marine environment.

*Keywords:* parametric antenna, frequency dispersion of a waveguide, branched signal propagation