

В МИРЕ МОЩНОГО ЗВУКА

Доктор физико-математических наук
О. В. РУДЕНКО,
кандидат физико-математических наук
В. О. ЧЕРКЕЗЯН



«Стоп! — приказал капитан, и подлодка тотчас остановилась на месте... — Целься! — Звук!...

В первую минуту во внешнем виде крейсера ничего не изменилось. Ультразвуковая пушка работала лишь на пяти десятых своей мощности. Вдруг... середина подводной части крейсера стала растягиваться, расползаться, словно глина. Спустя лишь одну минуту после начала ультразвуковой атаки середина обращенного к подлодке борта корабля неожиданно и сразу вдавилась внутрь его, потом вдруг, как огромный пузырь, лопнула, и гигантская струя воды ворвалась в трюмы, машинное отделение, артиллерийские погреба.»

Мы привели отрывок из некогда популярного научно-фантастического романа Гр. Адамова «Тайна двух океанов». (Быть может, кто-то из наших читателей лучше помнит двухсерийный приключенческий фильм с таким же названием.) Герои этого произведения совершают кругосветное путешествие на борту экспериментальной подводной лодки «Пионер» — чуда советской военной техники. Как подлодка, так и водолазы в автономных скафандрах вооружены ультразвуковым оружием, которое не раз выручало их в критических ситуациях. Мощным ультразвуком акванавты пытались разрушить скалу, завалившую выход из подводной пещеры; сразили огромного кашалота, который чуть не потопил загарпунивших его китобоев; уничтожили вражеский крейсер и даже... фантастических морских чудищ, похитивших одного из членов экипажа подводной лодки...

Возможно, читателю покажется излишним то внимание, которое автор уделил сражениям и погоней за шпионами, однако вспомним, что роман опубликован незадолго до начала войны. И тогда еще можно было думать, что использование ультразвука как оружия реально, что это вопрос техники, который со временем удастся решить. Однако...

В этой статье мы познакомим читателей с некоторыми задачами фи-

зики мощного звука и, в частности, покажем, почему использование мощных акустических (ультразвуковых) волн в качестве оружия неосуществимо (так что по крайней мере в этой части роман Гр. Адамова является сугубо фантастическим произведением). Что касается «мирного» использования мощных акустических волн, здесь положение иное: неразрушающие методы контроля, параметрические излучатели и антенны, ультразвуковая очистка поверхностей, сверление отверстий, разрушение почечных камней — вот лишь некоторые их применения.

За последние двадцать лет произошел колоссальный скачок в понимании того, как ведут себя волны больших амплитуд вообще и акустические волны в частности. Что мы знаем о мощных акустических волнах сегодня?

В журнале «Квант» уже рассказывалось об интересных явлениях, сопровождающих распространение больших волн на поверхности океана (см. статью Л. А. Островского в № 8 за 1987 год). Напомним: эффекты, которые проявляются только для достаточно сильных волн и зависят от их амплитуды, называют нелинейными эффектами. Уже сформировалась область науки, изучающая эти явления, — это физика нелинейных волновых процессов. Раздел физики, изучающий мощные акустические волны, получил название «нелинейная акустика». Эта наука занимает особое место в физике по широте исследуемых объектов. Изучаемые ею волны возбуждаются в газах, жидкостях, твердых телах, плазме. Они существуют в природных средах — в атмосфере, в океане, в грунтах, в объектах космических масштабов; примерами могут служить гром, подводные взрывы, сейсмические волны от землетрясений и многое, многое другое.

У читателя могут возникнуть вполне естественные вопросы. Первый вопрос: так какой же звук следует считать сильным (мощным), а какой слабым, где количественная граница этого разделения?

И второй вопрос: в чем заключаются нелинейные эффекты, что в них необычного или неожиданного, где они могут найти применение?

Постараемся ответить на эти вопросы по порядку. Но сначала напомним о том, что такое звуковая волна.

Звуковая волна представляет собой распространяющиеся в среде области сжатия и разрежения. В каждой точке среды происходит изменение давления, вызванное изменением степени сжатия. Это изменение давления накладывается на то среднее давление, которое существует в среде в отсутствие звуковой волны, и называют его звуковым давлением.

Звуковая волна несет с собой энергию — потенциальную энергию упругой деформации (если звук распространяется в атмосфере, то это энергия упругой деформации воздуха) и кинетическую энергию движущихся частиц (воздуха). Эта энергия течет в том направлении, в котором распространяется волна. Поток энергии, который проходит за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения волны, характеризует интенсивность звуковой волны.

Понятно, что и интенсивность I , и звуковое давление p зависят от свойств среды, в которой распространяется звук. Мы не будем выводить эти зависимости, приведем лишь формулу, связывающую p , I и характеристики среды — плотность ρ и скорость звука в среде c :

$$I = p_0^2 / 2\rho c$$

(p_0 — амплитуда звукового давления).

А теперь перейдем к вопросу о том, что такое «сильный» и «слабый» звук.

Силу звука принято определять уровнем звукового давления — величиной, которая связана с амплитудой звукового давления и измеряется в децибелах (дБ):

$$N = 20 \lg(p/p_n), \text{ дБ.}$$

Здесь p — это давление, уровень которого нас интересует, p_n — пороговое давление звука, условно принятое равным $2 \cdot 10^{-5}$ Па. Давление p_n примерно соответствует интенсивности $I_n =$

$= 10^{-12}$ Вт/м² очень слабого звука, который еще может воспринять человеческое ухо в воздухе на частоте 1000 Гц.

Звук тем сильнее, чем выше уровень звукового давления.

Субъективные представления о силе звука связаны с понятием «громкость», т. е. привязаны к диапазону частот, воспринимаемых ухом (см. таблицу). А как быть, когда частота звука лежит за пределами этого диапазона, в области ультразвука? Именно в этой ситуации, при опытах с ультразвуком на частотах порядка 1 МГц, легче всего наблюдать в лабораторных условиях нелинейные эффекты.

Таким образом, мы как бы замкнули круг: мощными имеет смысл называть такие акустические волны, для которых нелинейные эффекты становятся заметными.

Обратимся теперь к самим нелинейным эффектам. Известно, что обычная (линейная) волна звука малой амплитуды распространяется в среде, не меняя своей формы. При этом и области сжатия, и области разрежения перемещаются в пространстве с одной и той же скоростью — это и есть скорость звука в среде. Если источник звука генерирует (излучает), например, синусоидальную волну, то профиль ее остается синусоидальным на любом удалении от источника. В мощной же звуковой волне картина иная: области, где среда сжата (звуковое давление положительно), перемещаются со скоростью, большей скорости звука, а области разрежения — со скоростью, меньшей скорости звука в данной среде. В результате профиль волны искажается — передние склоны становятся более крутыми, а задние — более пологими. Похожая картина наблюдается для морских волн вблизи берега: гладкие волны зыби на мелководье изменяют свою форму, и в зоне прибоя, прежде чем разрушиться, приобретают крутой передний фронт. Образование крутого переднего фронта или разрыва представляет собой нелинейный эффект. То расстояние l_p , которое должна пройти

Интенсивность звука, звуковое давление и уровень звукового давления в различных случаях

Уровень звукового давления, дБ	Интенсивность звука, Вт/м ²	Звуковое давление, Па	Примерные условия, соответствующие данным таблиц
0	10 ⁻¹²	2 · 10 ⁻⁵	Порог слышимости.
10	10 ⁻¹¹	6,3 · 10 ⁻⁵	Шорох листьев в лесу; слабый шепот на расстоянии 1 м.
20	10 ⁻¹⁰	2 · 10 ⁻⁴	Тиканье карманных часов; разговор шепотом.
30	10 ⁻⁹	6,3 · 10 ⁻⁴	Читальный зал библиотеки.
40	10 ⁻⁸	2 · 10 ⁻³	Разговор вполголоса; негромкая музыка.
50	10 ⁻⁷	6,3 · 10 ⁻³	Слабая работа громкоговорителя.
60	10 ⁻⁶	2 · 10 ⁻²	Громкий разговор; улица средней оживленности.
70	10 ⁻⁵	6,3 · 10 ⁻²	Шум грузового автомобиля; шум внутри трамвая; игра на рояле (на расстоянии 10 м).
80	10 ⁻⁴	2 · 10 ⁻¹	Работа металлорежущего станка; громкоговоритель при максимальной громкости; шумная улица.
90	10 ⁻³	6,3 · 10 ⁻¹	В вагоне метрополитена; сирена скорой помощи.
100	10 ⁻²	2	В кабине пассажирского самолета.
110	10 ⁻¹	6,3	Сирена пожарного автомобиля; скорый поезд; пневматический молот.
120	10	20	Поршневой авиадвигатель; сильные раскаты грома.
130	100	63	Реактивный двигатель; болевое ощущение.

волна, чтобы ее форма заметно исказилась, называют длиной образования разрыва. Как и всякий нелинейный эффект, искажение профиля зависит от амплитуды волны p_0 — длина образования разрыва обратно пропорциональна амплитуде, т. е. $l_p \sim 1/p_0$. Чем сильнее волна, чем больше ее амплитуда, тем быстрее искажается профиль и тем на меньших расстояниях формируется разрыв.

Однако у этого процесса есть конкурент — обычное затухание волны в среде, обладающей вязким трением. Из-за этого затухания амплитуда волны уменьшается, что «притормаживает» процесс искажения профиля. Если затухание достаточно сильное и происходит на расстояниях l_a , меньших l_p , нелинейность может оказаться подавленной и не проявиться вовсе. Естественно, l_a , так же как и l_p , зависит от свойств среды, в которой распространяется звук.

Теперь мы можем уточнить определение мощной акустической волны: это такая волна, у которой $l_p < l_a$. Отношение l_a/l_p называют акустическим числом Рейнольдса и обозначают Re .

Когда $Re > 10$, волна сильная; при $Re \ll 1$ — слабая. Число Рейнольдса равно $Re = \alpha p_0 / f$, где f — частота зву-

ка, а коэффициент α — некоторая константа, характеризующая нелинейные и вязкостные свойства среды (то, как «откликается» среда на мощный сигнал, насколько она его искажает). Для разных сред значения α различны; для воды $\alpha \approx 300$ (Па · с)⁻¹. При распространении в воде звука с частотой $f \sim 1$ МГц условие $Re > 10$ выполняется для волн с амплитудой звукового давления $p_0 > 3 \cdot 10^4$ Па. Таким образом, сильная звуковая волна в воде — это волна с интенсивностью $I = p_0^2 / 2\rho c > \frac{(3 \cdot 10^4)^2}{2 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3} \text{ Вт/м}^2 = 300 \text{ Вт/м}^2$; соответствующий уровень звукового давления — $N > 180$ дБ.

Вернемся теперь к очень заманчивой идее передачи высоких плотностей энергии на большие расстояния при помощи акустического луча. Довольно длительное время считалось, что эта идея близка к реализации. Вдохновляющим примером в последние годы явилось лазерное излучение. Как известно, наверное, многим читателям, мощные лазерные импульсы способны разрушать конструкции, пробивать отверстия в препятствиях на значительном удалении от самой лазерной установки. На первый взгляд кажется, что замена света на звук в этих задачах принципиально возможна и

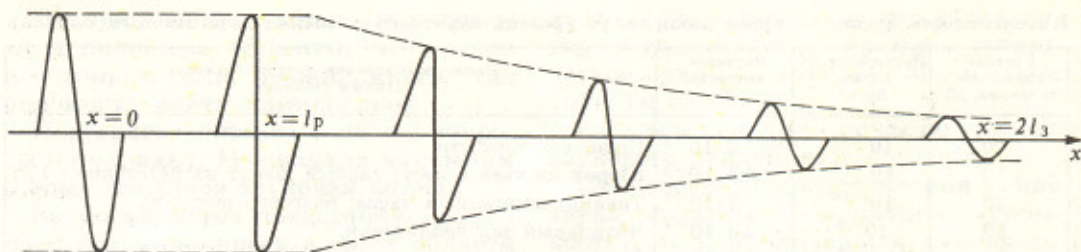


Рис. 1.

остается преодолеть лишь технические сложности. Однако существуют трудности принципиального порядка, которые делают бесперспективной идею создания ультразвукового оружия. Оказывается, что для любого заданного расстояния существует предельное значение интенсивности звуковой волны, достигающей цели, причем эта интенсивность тем меньше, чем больше расстояние до цели. И дело вовсе не в обычном затухании акустических волн при прохождении поглощающей среды, которое происходит по закону $p_x = p_0 e^{-x/l_a}$.

Обычно длина затухания для акустических волн тем меньше, чем больше частота звука, — $l_a \sim f^{-2}$, т. е. эффект затухания заметно усиливается с увеличением частоты. Однако можно так выбрать частоту, что обычное (линейное) затухание на нужных нам расстояниях будет пренебрежимо мало.*) Теперь представим себе, что в некотором месте пространства ($x=0$) мы задаем (генерируем) волну именно с такой частотой и с большой амплитудой, такой, что на поведении волны существенно скажутся нелинейные эффекты. Изменение формы одного периода волны при ее распространении показано на рисунке 1.

Мы видим, что до тех пор, пока волна находится на расстояниях $x \leq l_p$, она не затухает вовсе. Зато при $x > l_p$ начинается нелинейное затухание. Амплитуда волны уменьшается по мере удаления от источника как

$$p_0(x > l_p) = \frac{p_0}{1 + x/l_p}$$

*) Для сигнала частотой 1 МГц в воде $l_a \approx 50$ м, а l_p для ультразвука достаточно большой амплитуды может быть всего 10 см.

— тем быстрее, чем больше исходное значение амплитуды p_0 . При очень больших значениях начальной амплитуды единицей в знаменателе можно пренебречь по сравнению с другим слагаемым; амплитуда убывает пропорционально $1/x$, причем, поскольку $l_p \sim 1/p_0$, скорость убывания не зависит от величины начального сигнала p_0 . Этот процесс происходит до тех пор (до таких расстояний от источника), пока волна не затухнет столь сильно, что нелинейные эффекты «остановятся», и после этого волна перейдет в линейный режим распространения. Дальнейшее затухание происходит по законам линейной акустики, т. е. является гораздо более слабым и не зависит от величины исходного возмущения.

Можно получить выражение для предельного (максимального) значения амплитуды синусоидальной (на входе в среду) волны при совместном действии как нелинейных эффектов (затухания за счет образования крутого фронта волны), так и обычного линейного затухания, характеризующегося коэффициентом затухания $1/l_a$:

$$\lim_{p_0 \rightarrow \infty} p_0(x > l_p) = p_{\text{пред}}(x) = \frac{4f}{\alpha} e^{-x/l_a}$$

Еще раз обращаем внимание читателей на то, что амплитуда сигнала $p_0(x)$ на расстоянии $x \gg l_p$, как это следует из приведенного выражения, не зависит от величины (амплитуды) сигнала p_0 на излучателе. Существует конечный предел $p_0(x)$ при $p_0(x=0) \rightarrow \infty$. Какой бы мощный излучатель мы ни взяли, какой бы большой ни делали амплитуду исходного сигнала, для каждого заданного расстояния x невозможно получить сигнал больший, чем $p_{\text{пред}}(x)$.

Попробуем оценить, какая максимальная интенсивность может быть передана в воде на расстояние 100 м звуковой волной с частотой 1 МГц:

$$I_{\text{пред}} = \frac{p_{\text{пред}}^2(x=100 \text{ м})}{2c\rho} = \frac{8f^2}{c\rho\alpha^2} e^{-2x/l_a},$$

и подставляя $c \approx 1,5 \cdot 10^3$ м/с, $\rho \approx 10^3$ кг/м³, $\alpha \approx 300$ (Па·с)⁻¹, $l_a \approx 50$ м, получаем $I_{\text{пред}} \approx 1$ Вт/м². Таким образом, в условиях, наилучших для возбуждения мощного ультразвукового излучения (в воде), на расстоянии порядка 100 м от источника на приемную антенну площадью один квадратный метр за одну секунду можно передать очень малую энергию, порядка одного джоуля. Этой энергии достаточно, чтобы горела лампочка от карманного фонарика, но явно недостаточно для того, чтобы повредить корабль или травмировать кашалота.

Как же в таком случае возможны многочисленные технологические применения ультразвука, о которых мы упоминали ранее, — сверление отверстий, ультразвуковая очистка и т. д.? Дело в том, что эти операции проводятся на сравнительно небольших расстояниях от излучателя, где нелинейное затухание еще не успело заметно ослабить мощную волну и эффект насыщения еще не наступил.

У читателя может возникнуть вопрос — а как же объяснить сильное воздействие ударных волн на препятствия? Известно, что взрывные ударные волны могут разрушать сооружения, находящиеся довольно далеко от места взрыва. А ведь ударная волна — это сильно нелинейное образование, и поэтому затухание за счет нелинейных эффектов должно

происходить еще быстрее, чем у слабых волн, наблюдаемых в задачах нелинейной акустики.

Все дело в том, что одиночный импульсный сигнал (рис. 2) ведет себя не так, как периодический (сравните рисунки 1 и 2). Его пиковое значение уменьшается по мере удаления от источника по закону

$$p_0(x) = \frac{p_0}{\sqrt{1+x/l_p}}.$$

При больших начальных амплитудах p_0 можно пренебречь единицей под корнем в знаменателе; в этих случаях амплитуда одиночного сигнала в точке наблюдения, скажем у препятствия, зависит от амплитуды в точке излучения (взрыва) и расстояния как

$$p_0(x) = p_0 \sqrt{l_p/x} \sim \sqrt{p_0/x}.$$

Для нас существенна зависимость от исходной амплитуды p_0 . Мы видим, что при сильном проявлении нелинейных эффектов в случае ударной волны максимальное значение $p_0(x)$ не ограничивается на некотором предельном уровне, а только более медленно зависит от своего начального значения (пропорционально $\sqrt{p_0}$, а не p_0 как в линейном случае). Это означает, что, увеличивая амплитуду волны (например, силу взрыва), мы можем добиться на заданном (пусть даже большом) расстоянии больших давлений на препятствие и тем самым разрушить его.

До сих пор мы говорили об изменении формы мощной акустической волны и уменьшении ее амплитуды при распространении в среде. Но мы ничего не сказали о самом главном — о том, как меняется ее спектральный состав. Для приложений этот вопрос очень важен.

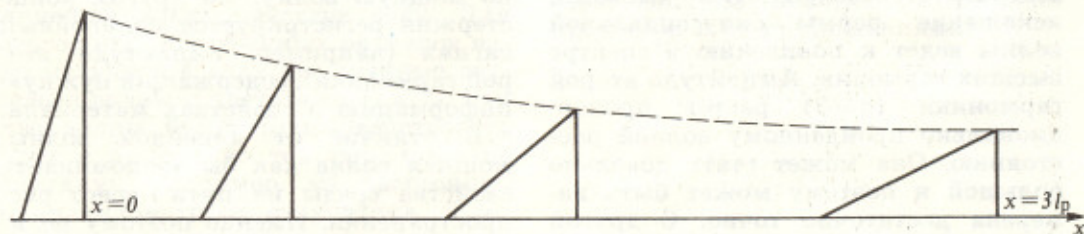


Рис. 2.

Напомним читателю, что такое спектр сигнала. По-видимому, слово «спектр» привычно ассоциируется с картинкой оптических спектров излучения атомов, содержащей набор разноцветных полос. Каждый атом характеризуется своим «спектральным портретом». Так, в спектре натрия выделяется желтая линия на длине световой волны 0,59 мкм. Как бы мы ни преобразовывали в линейной среде световую волну заданного спектрального состава (т. е. с известным набором линий поглощения) — пропускали бы ее через светофильтры, рассеивающие среды, усилители и т. д., — новых частот (или, что то же самое, новых спектральных линий) не возникает. Иное дело — нелинейное преобразование сигнала методами нелинейной оптики. Известно, что инфракрасный луч мощного лазера, пройдя через специально подобранный кристалл, может изменить свой цвет на зеленый. Частота световой волны при этом увеличивается в два раза.

Аналогичный эффект кратного увеличения частоты, или, как еще говорят, генерации высших гармоник, важен и для физики мощных акустических волн. Когда мы рассматривали искажение формы гармонического сигнала (см. рис. 1), мы фактически уже столкнулись с этим явлением. Действительно, спектр сигнала, изображенного на рисунке 1, состоит из набора равноотстоящих частот — основной частоты излучаемого сигнала f — эта частота соответствует исходному неискаженному синусоидальному сигналу — и высших гармоник nf ($n=2, 3, 4, \dots$), появившихся при распространении волны в нелинейной среде. Иными словами, искажение формы синусоидальной волны ведет к появлению в спектре высших гармоник. Амплитуда второй гармоники ($n=2$) растет пропорционально пройденному волной расстоянию. Она может стать довольно большой и поэтому может быть измерена достаточно точно. С другой стороны, при фиксированном расстоянии между излучателем и прием-

ником звука амплитуда второй гармоники зависит от упругих свойств среды, или, как говорят физики и материаловеды, от нелинейных модулей среды. Нашим читателям, вероятно, знаком модуль Юнга — величина, определяющая упругую деформацию твердого тела под действием приложенного механического напряжения (вспомним закон Гука). Модуль Юнга — это линейный модуль, так как в законе Гука деформация тела прямо пропорциональна напряжению (линейно зависит от него). При уточнении закона Гука в области больших напряжений, когда деформации нельзя считать упругими — материал становится «пластичным», «течет» и даже разрушается, — зависимость деформации от напряжения характеризуется уже нелинейными модулями среды.

Так вот, измеряя амплитуду второй гармоники прошедшей сквозь такую среду волны, мы тем самым измеряем нелинейные модули среды и, следовательно, можем судить о пластичности, прочности и других важных характеристиках материалов.

Теперь нам удастся понять смысл одного из важнейших приложений нелинейной акустики. При изучении свойств твердых материалов их обычно подвергают большим нагрузкам. С помощью специальных прессов создаются давления до десятков тысяч атмосфер. Вместо этой громоздкой и дорогостоящей аппаратуры иногда можно использовать более простой метод. К торцу стержня из исследуемого материала приклеивают излучатель звука, с помощью которого можно возбудить в стержне достаточно мощную волну. На другом конце стержня регистрируется нелинейный сигнал (например, амплитуда второй гармоники), содержащий нужную информацию о свойствах материала.

В отличие от линейной волны, мощная волна как бы «запоминает» свойства среды на пути своего распространения. Именно поэтому нелинейные сигналы используются для диагностики грунтов и водных сред,

непрозрачных для других видов излучения, но «прозрачных» для звука.

Если на своем пути мощная звуковая волна пересечет трассу другой волны (сигнала), она «запомнит» эту встречу, т. е. ее характеристики изменятся. Иными словами, мощный пучок служит своеобразной приемной антенной. Представьте себе: достаточно увеличить мощность звука, излучаемого, например, в воду, и мы получим приемную гидроакустическую антенну протяженностью в десятки и даже сотни метров. Такой антенной будет столб воды, в котором сосредоточен акустический пучок, т. е. пространство между излучателем и приемником. Разумеется, для слабых волн ничего подобного получить не удастся. Известно, что две линейные волны свободно проходят друг через друга, создавая в области пересечения интерференционную картину. Покидая область интерференции, каждая волна ведет себя точно так же, как если бы другой волны не было. Мощный пучок может служить не только приемной, но и излучающей антенной. Приборы, излучающие звук с помощью таких антенн, называют параметрическими излучателями. Для чего нужны эти приборы?

Известно, что единственный вид излучения, который может распространяться под водой на большие расстояния, — это звук. Без акустической связи невозможно освоить Мировой океан, использовать его богатства. Но для направленного излучения низкочастотного звука узким лучом нужны очень большие антенны с диаметром отражающей поверхности (зеркала) в десятки метров. Проблему изготовления огромных излучающих антенн можно обойти, используя нелинейное взаимодействие волн. Для этого антенной обычных размеров надо излучить в воду две мощные звуковые волны с частотами f_1 и f_2 . Эти две волны будут взаимодействовать друг с другом до тех пор, пока не затухнут, например, на расстоянии один километр от излучателя. В результате взаимодействия двух волн рождается сигнал на низкой (раз-

ностной) частоте $f_1 - f_2$, который затухает гораздо слабее и может распространяться на очень большие расстояния. Но самое важное — в том, что этот сигнал рождается не на поверхности антенны (там есть только сигналы с частотами f_1 и f_2), а в толще воды. Таким образом, километровый столб воды, в котором происходит взаимодействие, является гигантской излучающей антенной. Ее не нужно строить — она возникает сама по себе.

Параметрические излучатели нашли применение в геофизике, медицине, исследовании атмосферы. Но особенно полезными антенны такого типа оказались для морских исследований. Они позволили с большой точностью изучить рельеф дна, свойства грунта в придонных слоях моря. Интересное приложение нашла «параметрика» в археологии; с ее помощью пытались найти ценности, увезенные Наполеоном из Кремля и брошенные им при бегстве в 1812 году в заболоченных, заиленных озерах под Смоленском; найдены предметы, принадлежавшие полярным экспедициям первых лет освоения Арктики...

Сейчас уже организован массовый промышленный выпуск рыбопоисковых акустических локаторов, которые позволяют обнаруживать скопления рыбы у поверхности или у дна моря, в устьях рек, на мелководье — там, где обычные гидролокаторы неэффективны.

В этой статье мы лишь попытались обозначить некоторые из множества эффектов, происходящих в мощных акустических полях.

Нелинейная акустика — молодая наука, она развивается немногим более тридцати лет. Здесь есть чем заняться молодым исследователям, интересующимся физикой нелинейных процессов и ее приложениями.