

с изучением мелководных акваторий Мирового океана. Эти технологии могут также использоваться в смежных научных областях. Примером является когерентное сейсмоакустическое профилирование при поиске полезных ископаемых в морском дне, в котором применяются высококогерентные НЧГА-излучатели, что обеспечивает согласованное со средой когерентное пространственное и частотное накопление отражённых от морского дна сигналов и позволяет достичь уникальной эффективности при реконструкции глубоколежащих донных неоднородностей при выполнении требований экологической безопасности ГА-зондирования [13].

Работа выполнена при поддержке программой Президиума РАН "Фундаментальные проблемы океанологии: геология, физика, биология, экология", программой ОФН РАН "Фундаментальные основы акустической диагностики искусственных и природных сред", ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" (контракт 02.740.11.0565) и РФФИ (проект 09-02-00044).

Список литературы

1. Urlick R J *Principles of Underwater Sound* (New York: McGraw-Hill, 1975) [Урик Р Дж *Основы гидроакустики* (Л.: Судостроение, 1978)]
2. Munk W, Worcester P, Wunsch C *Ocean Acoustic Tomography* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995)
3. Абросимов Д И и др. *ДАН СССР* **299** 477 (1988) [Abrosimov D I et al. *Sov. Phys. Dokl.* **33** 123 (1988)]
4. Кацнельсон Б Г, Петников В Г *Акустика мелкого моря* (М.: Наука, 1997) [Katsnelson B G, Petnikov V G *Shallow Water Acoustics* (London: Springer, 2002)]
5. Гончаров В В и др. *Акустическая томография океана* (Н. Новгород: ИПФ РАН, 1997)
6. Лучинин А Г, Хилько А И *Акуст. журн.* **51** 228 (2005) [Luchinin A G, Khil'ko A I *Acoust. Phys.* **51** 182 (2005)]
7. Хилько А И и др. *Акуст. журн.* **53** 437 (2007) [Khil'ko A I et al. *Acoust. Phys.* **53** 381 (2007)]
8. Смирнов И П, Хилько А И, Романова Т В *Изв. вузов. Радиофизика* **51** 50 (2008) [Smirnov I P, Khil'ko A I, Romanova T V *Radiophys. Quantum Electron.* **51** 45 (2008)]
9. Хилько А И и др., в сб. *Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана. Сборник трудов XXII сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета по акустике РАН Т. 2* (М.: ГЕОС, 2010) с. 244
10. Раевский М А, Хилько А И *Изв. вузов. Радиофизика* **50** 20 (2007) [Raevsky M A, Khil'ko A I *Radiophys. Quantum Electron.* **50** 18 (2007)]
11. Авербах В С и др. "Об управлении группой взаимодействующих акустических монополей", Препринт № 190 (Горький: ИПФ АН СССР, 1988)
12. Смирнов И П, Смирнова И Р, Хилько А И *Акуст. журн.* **56** 813 (2010) [Smirnov I P, Smirnova I R, Khil'ko A I *Acoust. Phys.* **56** 1067 (2010)]
13. Лазарев В А и др., в кн. *Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей* (Отв. ред. С М Шаповалов) (М.: Научный мир, 2010) с. 300

PACS numbers: 43.25.+y, 43.30.+m, 87.50.Y

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201111m.1228

Обзор достижений в области физической акустики в 2010 году, по материалам Научного совета РАН по акустике

И.Б. Есипов

Одной из задач Научного совета РАН по акустике является информирование научной общественности о наиболее интересных результатах, полученных в ходе исследований в лабораториях Российской академии наук, в ведущих университетах и исследовательских институтах России. В составе совета работают секции, в которых обсуждается развитие исследований по следующим направлениям:

— *акустика океана* (руководитель А.Г. Лучинин, Институт прикладной физики РАН);

— *геоакустика* (руководитель А.В. Николаев, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН);

— *аэроакустика* (руководитель В.Ф. Копьев, Центральный аэрогидродинамический институт);

— *вибраакустика* (руководитель Ю.И. Бобровницкий, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН);

— *физическая акустика твёрдого тела и акустоэлектроника* (руководитель И.Е. Кузнецова, Саратовский филиал Института радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН);

— *физический ультразвук* (руководитель О.А. Сапожников, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет).

Как следует из тематики секций, главное внимание в Научном совете уделяется исследованиям в области физической акустики и приложениям результатов в смежных областях, таких как науки о Земле и инженерные науки.

Итоги научной деятельности за 2010 г. Научный совет РАН по акустике подвёл на двух сессиях, состоявшихся в Институте общей физики РАН им. А.М. Прохорова (ИОФ РАН) и в Институте радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН в ноябре и декабре 2010 г. соответственно. На этих сессиях были выявлены наиболее значимые достижения, которые мы и предполагаем обсудить в настоящей статье.

В качестве основных совет выделяет следующие наиболее яркие достижения 2010 г.:

— новое явление взрывной неустойчивости и пространственной локализации ультразвуковых волн в ферромагнетике;

— оригинальный метод метрологии в биологических тканях нелинейных полей ультразвуковых фокусирующих излучателей;

— экспериментальная демонстрация эффективности когерентных методов сейсмоакустического зондирования морского дна.

Кроме того, представляется важным отметить разработку экспериментального образца параметрической

И.Б. Есипов. Российский университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва, РФ, Акустический институт им. Н.Н. Андреева, Москва, РФ
E-mail: igor.esipov@mail.ru

акустической антенны для исследования океана на протяжённых трассах. Разработка была сделана в 2010 г., и сейчас появились первые результаты испытаний этого нового экспериментального инструмента, работающего на принципах нелинейной акустики.

Остановимся подробнее на каждом из этих результатов. Явление *взрывной неустойчивости ультразвука в магнетиках* было продемонстрировано и исследовано В.Л. Преображенским с сотрудниками в Международной лаборатории нелинейной магнитоакустики конденсированных сред Научного центра волновых исследований ИОФ РАН [1, 2].

Взаимодействие акустических (упругих) колебаний с нелинейной магнитной структурой создаёт условия для наблюдения сильнонелинейных акустических явлений в твёрдом теле. В лаборатории В.Л. Преображенского уже в течение ряда лет исследуются особенности нелинейного магнитоакустического взаимодействия в магнетиках. Дело в том, что для определённых типов акустических колебаний величина коэффициента связи между магнитным и акустическим полями в ряде магнитоупорядоченных веществ достигает нескольких десятков процентов. При этом магнитный вклад в ангармонические (нелинейные) модули упругости может составлять $\Delta C^{(3)} \approx (10^3 - 10^4)C^{(2)}$, где $C^{(2)}$ — упругий модуль второго порядка. Столь сильный эффективный ангармонизм, существенно превосходящий собственный ангармонизм кристаллической решётки, авторы называют гигантским [3]. В таких условиях заметно проявляются нелинейные эффекты высоких порядков. При этом вносимая нелинейность сильно зависит от внешнего магнитного поля.

В условиях модуляции переменным магнитным полем нелинейности третьего порядка оказывается возможным эффективное трёхфононное параметрическое возбуждение. Запороговая динамика фононных триад качественно отличается от исследовавшейся ранее параметрической генерации фононных пар в магнитных средах, проявляющейся, в частности, в обращении волнового фронта ультразвука с гигантским усилением [4, 5]. Теоретические исследования и численное моделирование показали, что запороговое трёхфононное взаимодействие с полем электромагнитной накачки в магнитоупорядоченных средах сопровождается развитием взрывной неустойчивости и пространственной локализацией ультразвуковых волн. На рисунке 1 представлен результат численного моделирования взрывного усиления бегущих волн в антиферромагнетике [6]. Экспериментально взрывная неустойчивость наблюдалась при возбуждении монокристаллов антиферромагнетиков $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [1] и FeVO_3 [2] двумя последовательными электромагнитными импульсами. Первый импульс с гармонической несущей, соответствующей собственной частоте кристалла, вызывал начальные акустические возмущения. За ним следовал импульс накачки на утроенной частоте, фаза которого изменялась по закону, обеспечивающему сингулярное возрастание интенсивности упругих ультразвуковых колебаний [1]. Результаты эксперимента, представленные на рис. 2, показывают, что специальная фазовая модуляция электромагнитной накачки обеспечивает подавление фазового механизма нелинейного ограничения амплитуды генерируемых волн и реализует условия для взрывной запороговой динамики трехфононных возбуждений.

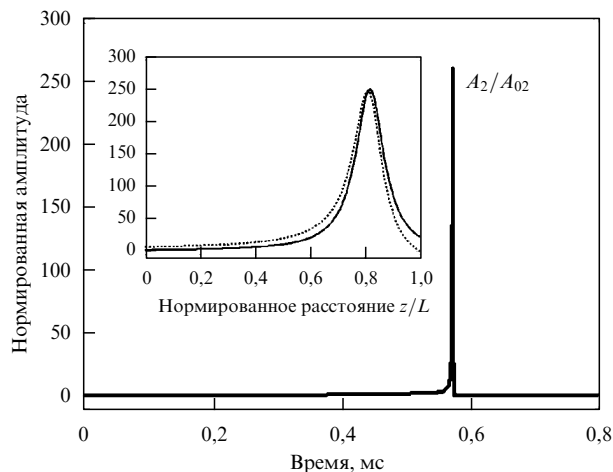


Рис. 1. Развитие во времени взрывного усиления бегущей волны в трёхфононном параметрическом процессе. На вставке показана пространственная локализация взаимодействующих волн: сплошная кривая — прямые волны, пунктирная кривая — обратная волна [4].

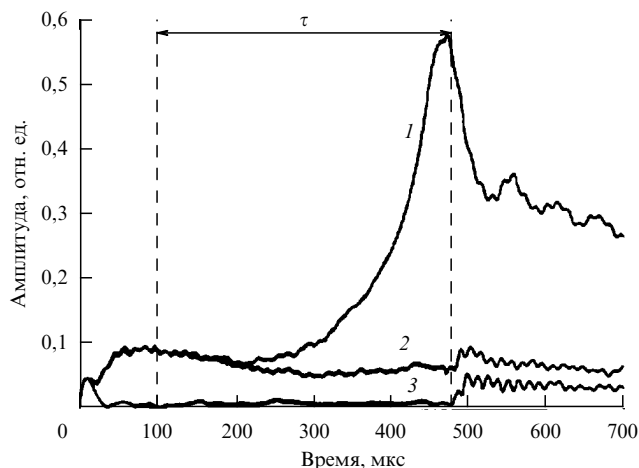


Рис. 2. Экспериментальная временная зависимость амплитуды магнитоупругих колебаний с частотой ω при возбуждении кристалла $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ поперечной электромагнитной накачкой на частоте 3ω : с фазовой модуляцией накачки (кривая 1), в отсутствие модуляции накачки (кривая 2), в отсутствие начального акустического возмущения (кривая 3); τ — длительность импульса накачки [5].

Среди наиболее важных результатов, полученных в области физического ультразвука, были отмечены исследования процессов *высокоинтенсивного фокусированного ультразвука (High Intensity Focused Ultrasound — HIFU)* в связи с возможностью их применения в неинвазивной хирургии. Результаты в этой области получены на кафедре акустики физического факультета МГУ.

Использование высокоинтенсивного фокусированного ультразвука для локального нагревания и разрушения ткани без обычного хирургического вмешательства и повреждения окружающих тканей является быстро развивающейся медицинской технологией [7]. Основным физическим механизмом разрушения ткани при HIFU-облучении — это поглощение тканью организма энергии ультразвука и переход этой энергии в тепло, ведущий к некрозу клеток внутри заданного объёма. Тепловые эффекты часто сопровождаются механическим разрушением ткани в результате возникающих под действием

ультразвука пузырьков. В последнее время наблюдается растущий интерес к использованию новых режимов механического разрушения (эмульсификации) тканей без тепловой коагуляции.

Кафедра акустики физического факультета МГУ является ведущим научным центром в России в области исследования физических процессов, возникающих при воздействии мощного фокусированного ультразвука на биологические ткани. Работы в этом направлении ведутся при тесном сотрудничестве с другими институтами и лабораториями России, с основными научными центрами по терапевтическому ультразвуку в США и Европе, фирмами-разработчиками HIFU-оборудования, метрологическими институтами различных стран.

Одним из важных направлений в развитии HIFU-технологий является использование нелинейных акустических явлений для повышения эффективности теплового воздействия на ткань и получения новых биоэффектов нетеплового характера. Интенсивности в фокусе HIFU-источников достигают нескольких десятков киловатт на 1 см^2 , при этом нелинейные эффекты приводят к образованию ударных фронтов (разрывов) в профиле волны с амплитудами до 60–100 МПа. Как известно, поглощение энергии нелинейной акустической волны, содержащей разрывы, принципиальным образом отличается от поглощения гармонических волн. Поглощение энергии гармонической волны пропорционально квадрату её амплитуды, а разрывной волны — кубу амплитуды разрыва. Такое различие может приводить к увеличению эффективности нагревания среды разрывными волнами в несколько десятков и даже сотен раз. Кроме того, ударные волны фокусируются в меньший объём, повышая локальность воздействия. Осуществление HIFU в режиме развитых разрывов позволяет получать быстрый локализованный нагрев и вскипание ткани за несколько миллисекунд, открывая новые возможности для развития HIFU-технологий [8, 9].

С целью управления нелинейными эффектами сотрудниками МГУ было предложено использовать импульсно-периодические режимы работы HIFU-излучателей с одинаковой средней по времени интенсивностью, но с различными пиковым давлением и скважностью импульсов [9]. В экспериментах, проведённых совместно с Центром медицинского и промышленного ультразвука в Сиэтле (SIMU APL), было показано, что такой подход позволяет осуществлять принципиально различающиеся воздействия на ткань [9]. Так, при непрерывном облучении ткани печени с малой исходной амплитудой (рис. 3а) волна в фокусе является гармонической и вызывает очаг теплового некроза ткани малого размера, который ясно виден на срезе ткани в фокальной плоскости (область белого цвета). При увеличении начальной амплитуды волны (рис. 3б) форма волны в фокусе искажается, эффективность нагрева увеличивается, что может приводить к совершенно неожиданному новому эффекту акустического воздействия на биологическую ткань. Оказалось, что если вскипание ткани происходит периодически в конце каждого из импульсов, то возможно чисто механическое разрушение (эмульсификация) ткани без теплового некроза (рис. 3б). Наконец, если амплитуда исходной волны и разрыва в фокусе очень велика и кипение происходит в течение более длительного времени внутри каждого из импульсов, то наблюдается разрушение в виде образования полости, окру-

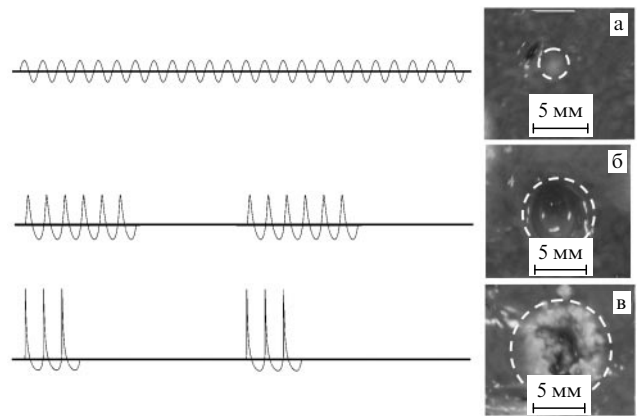


Рис. 3. Профили ультразвуковой волны в фокусе HIFU-источника и соответствующие им типы разрушений ткани при импульсно-периодическом HIFU-воздействии.

жённой зоной теплового некроза (рис. 3в). Таким образом, при одинаковой средней интенсивности исходной волны в ткани возможно получение разрушений различной морфологии и разных размеров.

Следует отметить, что до последнего времени в качестве основной характеристики HIFU-облучения использовалась именно средняя по времени интенсивность. Приведённые выше результаты показывают, что для адекватного прогнозирования ожидаемых эффектов необходимо гораздо большее число параметров ультразвукового поля. Разработанные сотрудниками кафедры акустики в сотрудничестве с Центром медицинского ультразвука в Сиэтле новые методы в метрологии ультразвуковых полей, создаваемых HIFU-излучателями [10], а также определения параметров нелинейного поля в биологической ткани по данным измерений либо моделирования в воде [11] были использованы Международной электротехнической комиссией в создаваемом первом международном стандарте применения ультразвука в хирургии.

Интересным развитием приложений HIFU является разработка методов облучения, в которых между излучателем и фокусом находятся акустические препятствия. Под последними понимаются, прежде всего, кости, в частности кости грудной клетки, которые затрудняют проведение ультразвуковых хирургических операций, например, на печени или сердце (рис. 4). Наличие в тканях организма сильно отражающих или сильно поглощающих акустических препятствий является существенным ограничением для ещё более широкого клинического использования HIFU. Поглощение ультразвука в костях на порядок выше, чем в мягких тканях. Сильно различаются также акустические импедансы, что приводит к отражению ультразвуковой энергии от рёбер. Другая сложность состоит в том, что по тем же причинам интенсивность в фокусе резко снижается и может оказаться недостаточной для разрушения тканей, находящихся за грудной клеткой. Недавние экспериментальные данные показывают, что при прямом облучении печени сквозь грудную клетку рёбра и кожа нагреваются даже сильнее, чем ткань в области фокуса. Это, безусловно, является недопустимым.

Решение данной проблемы стало возможным после создания мощных двумерных фазированных терапевти-

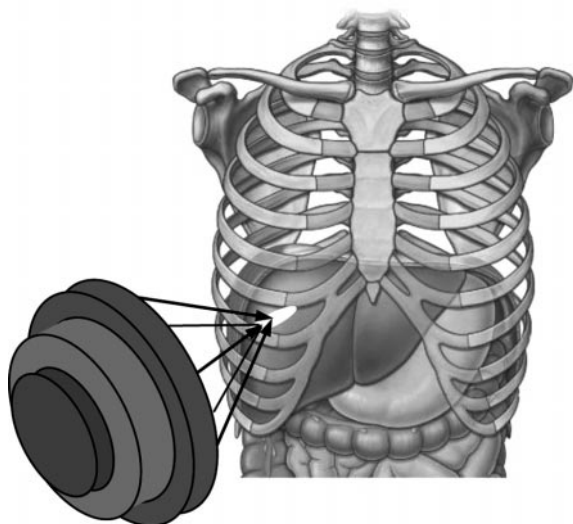


Рис. 4. Схема HIFU-облучения печени сквозь грудную клетку. Основным побочным эффектом операции является перегрев рёбер и вышележащих тканей, включая кожу, за счёт сильного поглощения ультразвука в кости и отражения от неё ультразвуковой энергии.

ческих решёток и разработки новых протоколов HIFU-облучения. Сотрудники кафедры акустики физического факультета МГУ при взаимодействии со специалистами Акустического института, а также с двумя известными научно-исследовательскими институтами Великобритании (Imperial College и Национальная физическая лаборатория (NPL)) разработали и опробовали новый метод, позволяющий минимизировать воздействие на рёбра и сохранить высокую интенсивность в фокусе при облучении печени [12, 13]. Суть метода в наиболее простой постановке заключается в отключении элементов решётки, находящихся напротив рёбер, таким образом, чтобы ультразвук проходил к фокусу в основном сквозь межрёберные промежутки. Более сложными в техническом отношении являются модификации метода с использованием специальных синтезированных амплитудных и фазовых распределений поля на элементах решётки, позволяющих уменьшать дифракционные эффекты при прохождении сквозь грудную клетку, обеспечивать сканирование фокуса электронным образом и создавать конфигурации из нескольких фокусов.

Работоспособность метода подтверждена в совместном эксперименте, выполненном в NPL. Использовалась решётка диаметром 170 мм, радиусом кривизны 130 мм, состоящая из 254 элементов диаметром 7 мм с частотой 1 МГц [12]. Была продемонстрирована *in vitro* возможность локального разрушения тканей, расположенных за костями грудной клетки. При этом наблюдался предсказанный в теории классический дифракционный эффект: в фокальной плоскости за рёбрами, наряду с основным фокусом, появлялись два вторичных максимума. Механизм этого эффекта обусловлен интерференцией волн от двух и более пространственно разделённых источников, которыми являются межрёберные промежутки [14]. В ткани при этом также формируются три разрушения, что необходимо учитывать при разработке клинических протоколов. Проведённые исследования позволили получить новые данные о механизмах эффектов, возникающих при прохождении HIFU через акустические препятствия, дать количе-

ственные оценки важного для практического применения эффекта расщепления фокуса. Полученные данные свидетельствуют о принципиальной возможности применения предложенного метода в клинической практике для разрушения тканей, расположенных за костями грудной клетки, без перегрева костей и вышележащих тканей.

Экспериментальная демонстрация эффективности когерентных методов сейсмоакустического зондирования морского дна. Стандартный для современной практики морской сейсморазведки подход к решению проблемы профилирования неоднородной донной структуры, содержащей многочисленные отражающие слои, состоит в использовании некогерентных импульсных источников (как правило, пневмопушек или искровых разрядников — спаркеров) и протяжённых приёмных антенных систем (сейсмокос). Мощные пневмопушки обеспечивают уровень сигнала в низкочастотном диапазоне (до ≈ 100 Гц), который, с учётом характеристики направленности протяжённой приёмной антенны, оказывается достаточным для достижения требуемых глубин зондирования (до нескольких километров). Возможность увеличения пространственного разрешения при использовании подобных излучателей связана с уменьшением длительности самого сигнала, которая ограничена снизу конструктивными особенностями и составляет не менее ≈ 10 мс, что при характерных значениях скорости звуковых волн в донных породах обеспечивает разрешающую способность на уровне нескольких десятков метров.

Применение когерентных методов в сейсмических исследованиях имеет целый ряд преимуществ, связанных прежде всего с возможностью использования длительного когерентного накопления принимаемых сигналов [15–17]. Наибольший интерес для практического использования в данном случае представляют так называемые сложные сигналы — широкополосные модулированные сигналы с большой базой (произведением длительности импульса T на полосу его спектра F). Такие сигналы, как известно, имеют функцию автокорреляции с характерной шириной главного максимума, меньшей длительности самого сигнала в FT раз ($FT \gg 1$). Это означает, что при свёртке принятого сигнала с опорным излучением практически вся его мощность концентрируется в узком максимуме корреляционной функции, который физически эквивалентен короткому одиночному импульсу, но значительно большей излучаемой мощности (в то же число раз, равное базе сигнала). Кроме того, при достаточно хорошей повторяемости таких сигналов появляется возможность когерентного накопления энергии длинной последовательности сигналов, что также увеличивает глубину зондирования. В результате уровень излучаемой мощности сигнала может быть существенно понижен при обеспечении нужной эффективности зондирования — глубины и (или) контраста исследуемой структуры донных слоёв. Более того, этот энергетический выигрыш позволяет рассматривать возможность применения для сейсмоакустического зондирования высокочастотных (до ≈ 1 кГц) сигналов. Применение высокочастотных сигналов создаёт условия для более высокого пространственного разрешения и существенно упрощает техническую реализацию системы в целом.

Подчеркнём, что особенности когерентного подхода не являются сколько-нибудь специфическими для морской сейсмоакустики. Напротив, они достаточно широко используются в радиофизических методах зондирования неоднородных сред. Однако сегодня в морской сейсморазведке не применяются источники с когерентными свойствами излучаемого сигнала, достаточными для практической демонстрации отмеченных преимуществ.

В последние два десятилетия, в связи с созданием в Институте прикладной физики (ИПФ) РАН ряда мощных гидроакустических источников в диапазонах частот от нескольких сотен герц до нескольких килогерц, способных излучать высокостабильные и хорошо управляемые сигналы, в том числе широкополосные сложные сигналы, возникла реальная возможность практической разработки когерентного подхода для целей сейсморазведки морского дна. Типичные и хорошо известные варианты выбора таких сигналов — сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и фазоманипулированные (так называемые псевдослучайные) сигналы. Эти сигналы обладают примерно одинаковыми возможностями по разрешающей способности, и при использовании излучателей, управляемых программируемым образом от компьютера, может быть использован тот или иной режим формирования сигналов. Стабильность самих источников ограничивается лишь техническими характеристиками задающих генераторов. Благодаря цифровому управлению излучением реализуется любой из возможных когерентных подходов, а именно: согласованная фильтрация и свёртка с опорным сигналом, длительное накопление последовательности сигналов, синтез протяжённой апертуры одиночным приёмником (накопление сигналов по пространственной координате) и соответствующее формирование её направленных свойств.

Сотрудниками ИПФ РАН и Института океанологии РАН выполнен ряд совместных экспериментов на акватории Каспийского моря, демонстрирующих возможности когерентных методов в морской сейсмоакустике [18]. Использовались гидроакустические излучатели, генерирующие синхронизированные последовательности импульсных ЛЧМ-сигналов в различных частотных полосах (≈ 50 – 100 Гц) в пределах широкого диапазона (≈ 100 – 1000 Гц); наибольшая мощность излучения, около 130 Вт, отвечала полосе 180 – 230 Гц. В качестве приёмной системы использовалась сейсмокофа, состоящая из 25 синфазных гидрофонов. Процедуры когерент-

ной обработки принимаемых (отражённых от донных слоёв) сигналов включали в себя согласованную фильтрацию отдельных импульсов (свёртку с опорным сигналом) и накопление последовательности сигналов. Длительность накопления ограничивалась изменениями глубины погружения излучателя, а также изменениями в структуре дна. В конкретных экспериментальных условиях возможность когерентного накопления последовательности отражённых от донных слоёв импульсов ограничивалась интервалом ≈ 100 – 200 с при буксировке гидроакустического излучателя со скоростью три узла. Это позволяло осуществлять эффективное накопление до нескольких десятков импульсов (≈ 30). В целях повышения качества реконструкции донной структуры был разработан метод послыого траекторного накопления импульсов с учётом наклонов отдельных отражающих слоёв, который позволил не только увеличить число импульсов в когерентной последовательности (практически до нескольких сотен), но и адаптивно оценить эти наклоны. Подчеркнём, что большинство принятых сигналов имело низкую помехоустойчивость (отношение уровня сигнала к шуму составляло не более 5 дБ). Однако выигрыш в отношении сигнал/шум в результате когерентной обработки сигнала достигал 30 дБ, что позволило определять структуру донных слоёв в интервале глубин примерно до 1000 м.

На рисунках 5, 6 показаны результаты зондирования донной структуры вдоль одной из трасс. Фрагменты структуры, содержащие слабоконтрастные слои, были обнаружены в результате накопления серии до 100 импульсов. В то же время только автокорреляционное сжатие отдельных импульсов не обеспечивало сколько-нибудь заметного контраста в условиях относительно небольшого (≈ 10) значения базы используемых ЛЧМ-сигналов. Эксперименты показывают, что сейсмоакустическое зондирование структуры морского дна на глубинах до ≈ 1000 м с высоким пространственным разрешением может быть реализовано при использовании относительно маломощных (≈ 100 Вт) высокочастотных (в диапазоне нескольких сотен герц) когерентных гидроакустических источников.

Разработка экспериментального образца параметрической акустической антенны для исследования океана. В Акустическом институте им. Н.Н. Андреева совместно с Таганрогским технологическим институтом Южного федерального университета была разработана параметрическая антенна для мониторинга морских акваторий

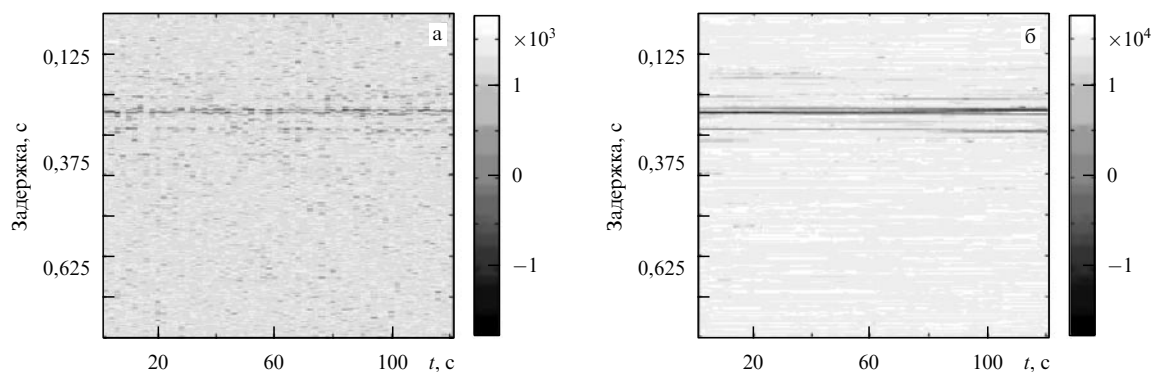


Рис. 5. Фрагменты сейсмограммы, отвечающие отдельному донному слою, полученные без применения процедуры когерентного накопления серии импульсов (а) и с накоплением серии из 16 когерентных импульсов (б). Показанный интервал временных задержек 0 – 1000 мс отвечает глубинам до ≈ 1000 м.

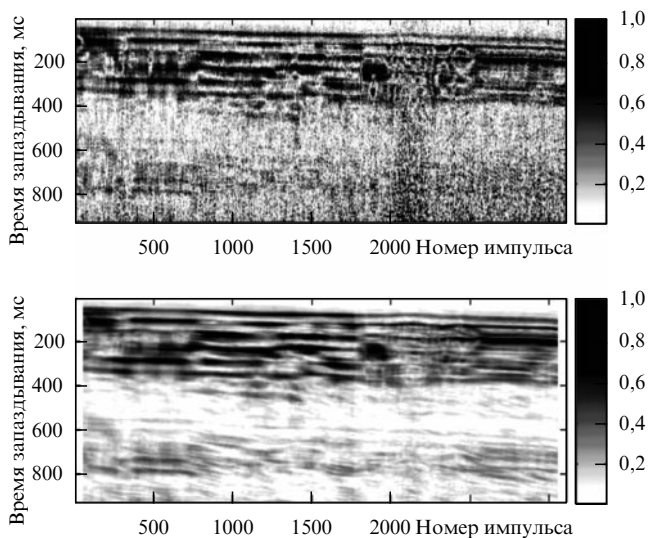


Рис. 6. Сейсмограммы, полученные по результатам зондирования с помощью ЛЧМ-сигналов в частотной полосе 180–230 Гц без использования межимпульсного накопления (а) и в результате применения процедуры адаптивного траекторного накопления серии до 100 импульсов (б).

на протяжённых трассах и создан её экспериментальный образец. Эта работа выполнялась в рамках проекта Международного научно-технического центра при финансовой поддержке Евросоюза. Особенностью такой гидроакустической антенны, действующей на принципах нелинейной акустики, является чрезвычайно узкая диаграмма направленности для низкочастотных акустических сигналов. Ширина диаграммы параметрической антенны практически постоянна в широкой полосе частот. Зондирующий сигнал формируется в морской среде, которая возбуждается мощной высокочастотной акустической накачкой, модулированной по интенсивности. В результате нелинейного взаимодействия высокочастотная накачка детектируется и в морской среде формируется антенна бегущей волны, которая генерирует остронаправленное излучение сигнала на частоте модуляции. Такой низкочастотный акустический сигнал, излучённый параметрическим образом, будет далее распространяться в море независимо от высокочастотной накачки. Благодаря нерезонансному способу генерации низкочастотного сигнала параметрическая антенна обеспечивает излучение зондирующих сигналов в чрезвычайно широкой полосе частот (более чем две октавы). Поэтому реализация данного проекта позволит испытать принципиально новую, работающую на принципах нелинейной акустики, излучающую акустическую систему для зондирования морских акваторий и океана на протяжённых трассах. Такая акустическая система (рис. 7) отличается сравнительно небольшими габаритами (размеры излучающей апертуры $0,7 \times 2 \text{ м}^2$), широкой частотной полосой сигнала (300 Гц–3000 Гц) и высокой направленностью излучения (не хуже 2° в вертикальной плоскости) во всём частотном диапазоне. Указанные характеристики позволяют хорошо согласовать направленное параметрическое излучение с волновой структурой в море.

В настоящее время эта антенна проходит испытания на акватории Сухумского гидрофизического института. Расчётные характеристики параметрической антенны

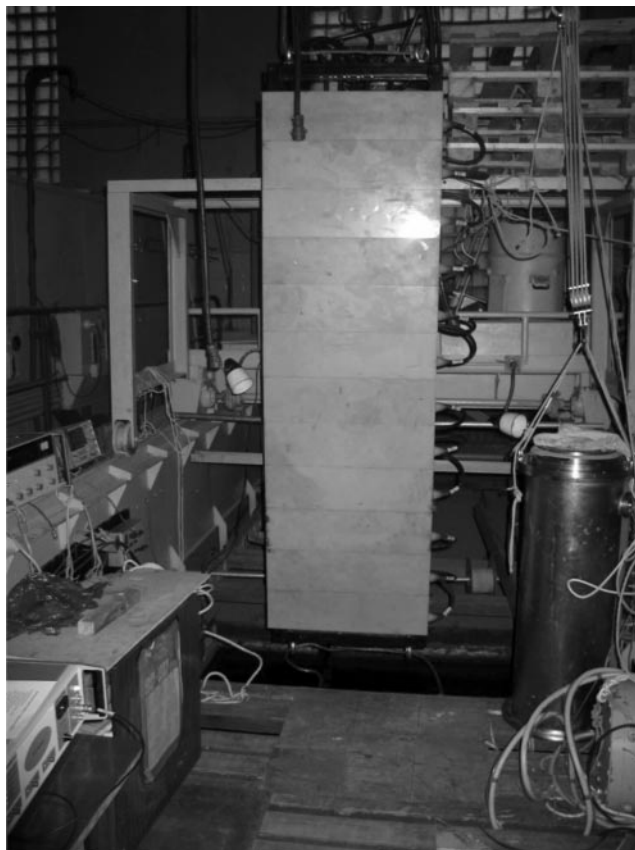


Рис. 7. Параметрическая антенна перед испытаниями в гидроакустическом бассейне.

должны обеспечивать одномодовое возбуждение морского волновода, эффективного для мониторинга Чёрного моря, или океанологические исследования на дистанции до 1000 км. Заметим, что впервые возможность применения параметрической антенны для океанологических исследований на протяжённых трассах была показана 20 лет назад [19, 20].

Полученные характеристики этой параметрической антенны создают возможность для исследования особенностей частотной дисперсии при распространении акустического сигнала в морском волноводе. На рисунке 8а показано распределение скорости распространения звука по глубине, типичное для Чёрного моря в весенний период. Это распределение вызывает изменения в скорости распространения сигналов разных частот. Частотная зависимость групповой скорости для первой моды этого волновода показана на рис. 8б. Как видно из рисунка, в области частот, меньших 2 кГц, дисперсия при распространении широкополосного сигнала может быть заметной. На рисунке 9 показано влияние такой дисперсии на распространение акустического сигнала в черноморском волноводе в полосе частот от 300 Гц до 1800 Гц. Видно, что в этих условиях в результате дисперсии длительность сигнала изменяется почти в 25 раз при соответствующем изменении интенсивности. Этот эффект будет более выраженным на трассах большей протяжённости. Предварительные экспериментальные исследования, выполненные в условиях распространения излучения параметрической антенны в мелководном волноводе [21], показали, что при согласованной с волноводом частотной модуляции длительность излучённого сигнала умень-

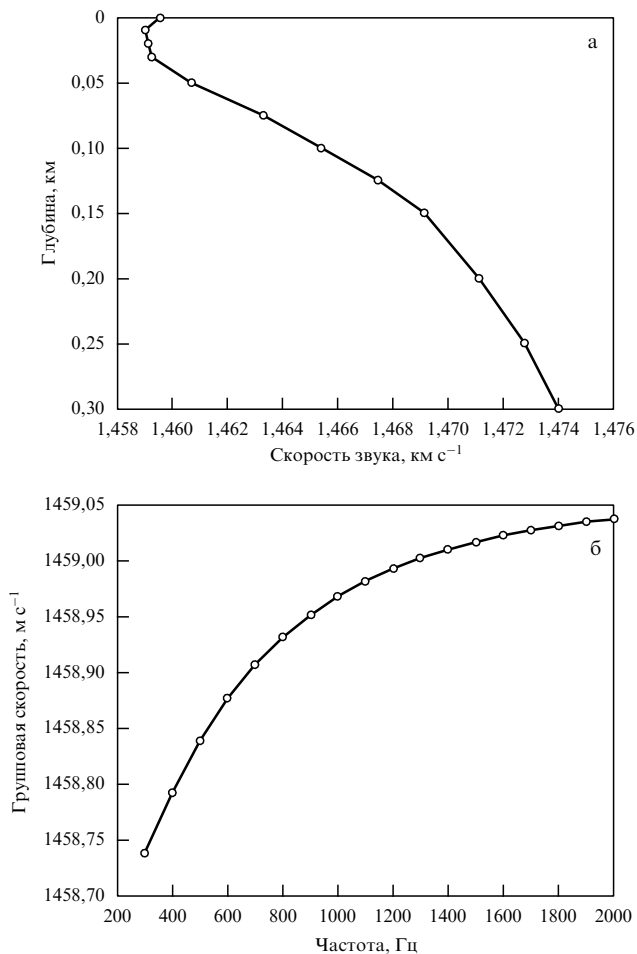


Рис. 8. (а) Профиль скорости звука в Чёрном море в феврале-марте. (б) Соответствующая профилю, приведённому на рис. а, зависимость групповой скорости первой моды от частоты.

шается, что приводит к возрастанию отношения сигнал/шум, а следовательно, и эффективности акустических средств в морском волноводе.

Таким образом, этот новый инструмент для океанологических исследований создаёт условия для селективного возбуждения мод в широкой полосе частот, что в свою очередь открывает возможность исследования новой океанологической характеристики — частотной дисперсии сигналов в волноводе. Исследование этой характеристики дополнит наши знания об особенностях распространения акустических сигналов в волноводных структурах океана.

Список литературы

1. Preobrazhensky V et al. *J. Magn. Magn. Mater.* **322** 585 (2010)
2. Yevstafeyev O et al. *J. Magn. Magn. Mater.* **323** 1568 (2011)
3. Ожогин В И, Преображенский В Л *УФН* **155** 593 (1988) [Ozhogin V I, Preobrazhenskii V L *Sov. Phys. Usp.* **31** 713 (1988)]
4. Брысев А П, Крутянский Л М, Преображенский В Л *УФН* **168** 877 (1998) [Brysev A P, Krutyanskiy L M, Preobrazhenskii V L *Phys. Usp.* **41** 793 (1998)]
5. Преображенский В Л *УФН* **176** 108 (2006) [Preobrazhenskii V L *Phys. Usp.* **49** 98 (2006)]
6. Preobrazhensky V, Bou Matar O, Pernod P *Phys. Rev. E* **78** 046603 (2008)
7. Хохлова В А, *Прогр. международного онкологического научно-образовательного форума "ОНКОХИРУРГИЯ-2010" В буду-*

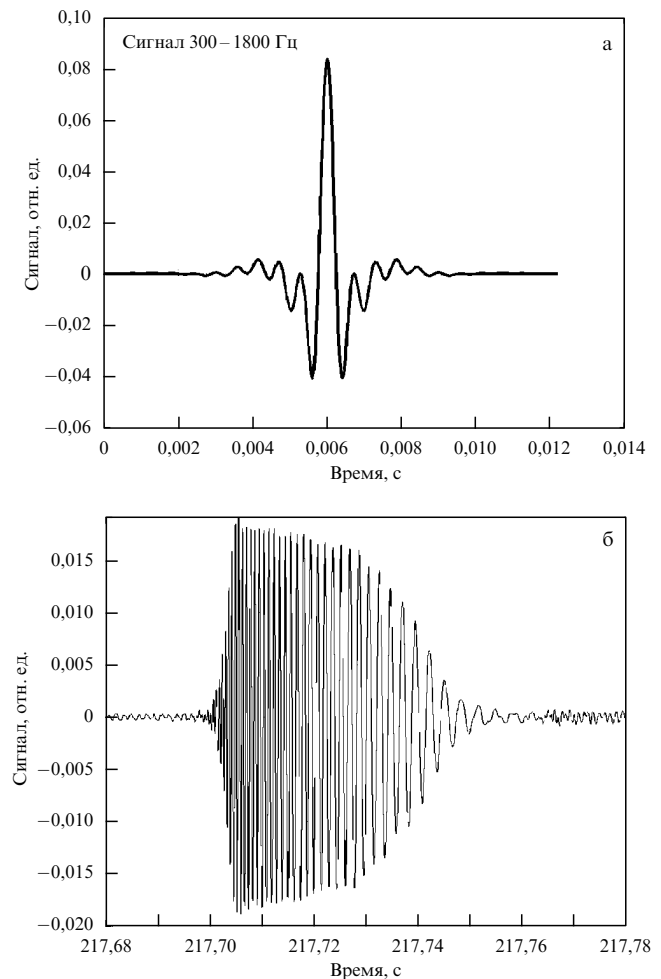


Рис. 9. Пример влияния частотной дисперсии на распространение акустического сигнала в черноморском волноводе (рис. 8а). (а) Импульс в полосе частот от 300 Гц до 1800 Гц. (б) Тот же импульс на дистанции 318 км — сначала приходят высокие частоты, затем низкие; длительность импульса на этой дистанции около 50 мс.

щее через новые технологии", Москва, 31 мая – 2 июня 2010, с. 7; <http://www.oncology.ru/events/2010/05/31/program/program.pdf>

8. Canney M S et al. *Ultrasound Med. Biol.* **36** 250 (2010)
9. Canney M S et al. *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 1760 (2010)
10. Kreider W et al., in *2nd Intern. MRgFUS Symp.: Current and Future Applications of MR-guided Focused Ultrasound, October 17–20, 2010, Washington, DC, USA*, p. 79
11. Бессонова О В и др. *Акуст. журн.* **56** 380 (2010) [Bessonova O V et al. *Acoust. Phys.* **56** 354 (2010)]
12. Bobkova S et al. *Ultrasound Med. Biol.* **36** 888 (2010)
13. Гаврилов Л Р и др. *Медицинская физика* (3(47)) 53 (2010)
14. Хохлова В А, Бобкова С М, Гаврилов Л Р *Акуст. журн.* **56** 622 (2010) [Khokhlova V A, Bobkova S M, Gavrilov L R *Acoust. Phys.* **56** 665 (2010)]
15. Лебедев А В, Малеханов А И *Изв. вузов. Радиофизика* **46** 579 (2003) [Lebedev A V, Malekhanov A I *Radiophys. Quantum Electron.* **46** 523 (2003)]
16. Авербах В С и др. *Акуст. журн.* **45** 5 (1999) [Averbakh V S et al. *Acoust. Phys.* **45** 1 (1999)]
17. Авербах В С и др., в кн. *Фундаментальные исследования океанов и морей* Кн. 2 (Гл. ред. Н П Лаверов) (М.: Наука, 2006) с. 500
18. Лазарев В А и др. *Акуст. журн.* (в печати)
19. Есипов И В и др. *Акуст. журн.* **39** 173 (1993) [Esipov I V et al. *Acoust. Phys.* **39** 89 (1993)]
20. Есипов И В и др. *Акуст. журн.* **40** 71 (1994) [Esipov I V et al. *Acoust. Phys.* **40** 61 (1994)]
21. Есипов И Б и др. *Акуст. журн.* **55** 56 (2009) [Esipov I V et al. *Acoust. Phys.* **55** 76 (2009)]