

Перспектива применения методов нелинейной акустики для гидрофизических исследований на протяженных трассах

И. Б. Есипов^{1,*}, О. Е. Попов², И. И. Сизов³

¹Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, кафедра физики, Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., д. 65, корп. 1

²Акустический институт. Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4

³Гидрофизический институт АН Абхазии, Сухум

(Статья поступила 10.11.2014; Подписана в печать 28.11.2014)

Представлены результаты испытания мощной параметрической антенны на полигоне Сухумско-го Гидрофизического института. Обсуждаются возможности методов нелинейной акустики для гидрофизических исследований на протяженных трассах, открывающиеся при согласовании направленного широкополосного сигнала, излучаемого параметрической гидроакустической антенной, с частотными характеристиками морского волновода. Представлены результаты исследований, демонстрирующие одномодовое возбуждение волновода параметрической антенной в широкой полосе частот. Показана возможность сжатия широкополосного сигнала при его распространении в результате волноводной дисперсии, что приводит к росту соотношения между сигналом и шумом. Рассматривается перспектива применения параметрического узконаправленного излучателя для исследования гидрофизических характеристик морской среды на Черном море и в Арктике.

PACS: 43.25.Lj, 43.30.Vr

УДК: 534.231

Ключевые слова: параметрическое излучение, волноводная дисперсия, одномодовое распространение звука.

ВВЕДЕНИЕ

Методы нелинейной акустики лежат в основе принципов работы так называемой гидроакустической параметрической антенны. Параметрическая антенна (ПА) формируется в среде при коллинеарном взаимодействии интенсивных звуковых волн, часто называемых накачкой. Излучение накачки имеет, как правило, на порядок более высокую частоту по сравнению с излучением параметрической антенны и оно обеспечивается направленным высокочастотным излучателем. Таким образом, ПА является виртуальной антенной и представляет собой область среды, в которой в результате нелинейного взаимодействия волн накачки возбуждается низкочастотное параметрическое излучение. ПА достаточно хорошо известна, как инструмент для профилирования донных структур. Особенностью ПА является чрезвычайно узкая диаграмма направленности (обычно несколько градусов углового разрешения) для низкочастотных сигналов [1]. Эффективная ширина диаграммы остается постоянной в широком диапазоне частот. ПА отличается от обычных относительно небольшими размерами (размер излучающей апертуры 0,7 м×2 м в нашем случае), широкой частотной полосой излучаемого сигнала (300–3000 Гц) и острой характеристикой направленности ($2^\circ \times 8^\circ$) во всем частотном диапазоне. Практика применения ПА показывает, что они обеспечивают одномодовое возбуждение подводного звукового канала [2,3]. Применение широкополосных сигналов открывает возможность для развития нового подхода акустической то-

мографии морских акваторий с использованием процедуры частотной обработки сигналов, распространяющихся по одной трассе, вместо известной процедуры пространственной обработки сигналов, распространяющихся по разным трассам [4]. Л. М. Бреховских отмечал, что акустические характеристики ПА делают ее «идеальным инструментом для акустики океана» [5]. В настоящей работе обсуждается перспектива применения мощных параметрических антенн для гидрофизических исследований на протяженных трассах.

1. ЧАСТОТНАЯ ДИСПЕРСИЯ СИГНАЛА ПА В МОРСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Практика применения параметрических антенн показывает, что с их помощью можно передавать широкополосный сигнал, наилучшим образом согласованный со слоистой структурой океанического волновода. Предварительные расчеты, которые были сделаны для особенностей применения параметрических антенн, показывают возможность управлять числом возбуждаемых мод сигнала.

Обычно подводный волновод формируется верхним теплым слоем воды и холодным промежуточным. Поэтому мониторинг толщины волновода может дать весьма ценную информацию о морском волноводе и изменениях его параметров. Прямые измерения вертикального распределения температуры и солености на трассе протяженностью в сотни километров параметров холодного промежуточного слоя являются трудными и дорогостоящими. Постоянный мониторинг его динамики на протяженной трассе может быть осуществлен акустическими методами. Проблема определения параметров слоя может быть решена с помощью одно-

*E-mail: igor.esipov@mail.ru

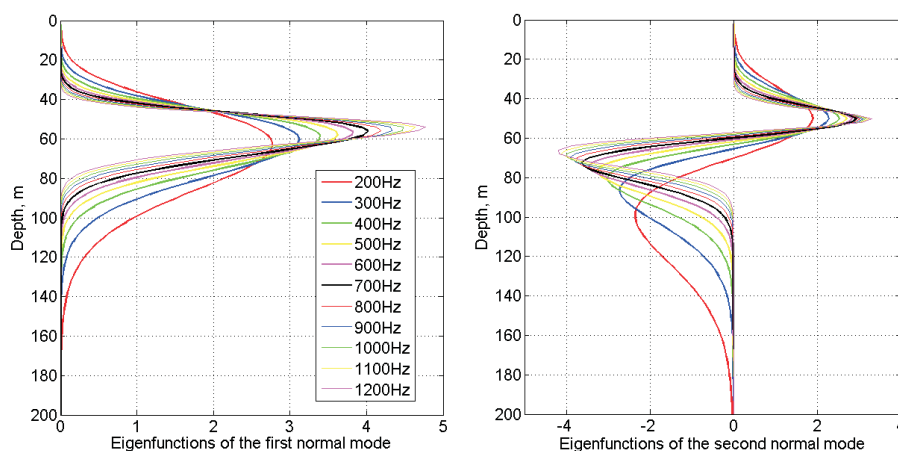


Рис. 1: Собственные функции первой и второй моды в частотном диапазоне от 200 Гц до 1200 Гц для сентябрьского профиля скорости звука

модового возбуждения акустических сигналов в широкой полосе частот. Измерение скорости распространения звука вдоль протяженной трассы позволит изучить один из типичных акустических эффектов подводного волновода — модовую дисперсию. Модовая дисперсия в подводном волновом канале означает, что моды одного и того же номера имеют различную групповую скорость распространения на различных частотах. Поэтому широкополосные сигналы меняют свою форму в процессе распространения, и это изменение может быть экспериментально зафиксировано. Измерение групповой скорости позволит определить средний профиль скорости звука в подводном волноводе, что дополняет непосредственные измерения вертикального разреза скорости звука по трассе.

Наиболее информативной для определения профиля скорости звука в подводном звуковом канале является дисперсия мод нижних номеров с первой по третью. Это связано с тем фактом, что собственные функции этих мод концентрируются в подводном волноводе и их групповая скорость наиболее чувствительна к вертикальному профилю волновода. На рис. 1 показана частотная зависимость первых двух собственных функций черноморского волновода.

Поскольку собственные функции волновода меняются в соответствии с особенностями профиля скорости распространения звука в волноводе, исследование его собственных функций в широкой полосе частот с помощью сигналов параметрической антенны может восстановить профиль скорости звука и обеспечить мониторинг океана на протяженных трассах.

Морской волновод обладает частотной дисперсией скорости распространения акустического сигнала. Величина дисперсии зависит от профиля скорости звука по глубине и от толщины волновода [6]. Частотная дисперсия приводит либо к разрушению коротких широкополосных импульсов, которые распространяют-

ся 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. На рис. 2 представлены результаты моделирования искажения формы сигнала в черноморском волноводе при его распространении по трассе длиной 500 км. Как видно, длительность сигнала меняется в 16 раз в этих условиях.

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

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

Таким образом, при сжатии сигнала в результате волноводной дисперсии возможно увеличение его интенсивности в T/τ раз:

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

То есть эффект увеличения интенсивности пропорционален дистанции, на которую распространяется сиг-

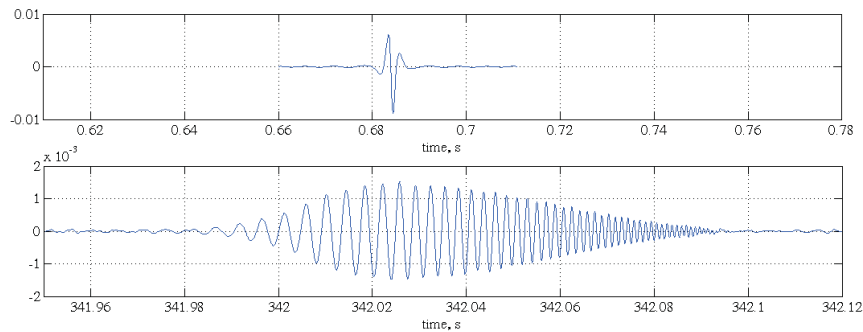


Рис. 2: Первая мода Черноморского волновода. Сигнал в полосе частот 200–1200 Гц на дистанции 1 км (верхний рисунок). Тот же самый сигнал на дистанции 500 км. По оси абсцисс — время распространения в сек

нал, величине волноводной дисперсии и квадрату частотной полосы сигнала. При этом увеличивается соотношение между сигналом и шумом, который накапливается в регистрирующей аппаратуре за время приема сигнала τ . Заметим, что групповая скорость распространения сигнала в волноводе определяется параметрами волновода. В частности, для волновода Пекериса с постоянной, независящей от глубины скоростью распространения звука A_0 , частотная зависимость скорости распространения сигнала определяется соотношением:

$$A = A_0 \left[1 - \frac{c_0^2 n^2}{(2fH)^2} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

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

За область сжатия в результате дисперсии сигнал вновь увеличивает свою длительность с соответствующим снижением интенсивности. Протяженность области сжатия сигнала l , где интенсивность сигнала падает вдвое, можно оценить согласно выражениям (1), (2) как

$$l = L \frac{\tau}{T}. \quad (4)$$

Несмотря на невысокие значения частотной дисперсии $\partial c / \partial f$ при достаточной полосе сигнала и протяженности трассы сигнал можно сжать от нескольких десятков до сотни раз с соответствующим увеличением интенсивности и ростом соотношения сигнал/шум. Это обстоятельство позволяет создавать в заданной части

акватории за счет настройки частотной полосы сигнала акустические барьеры с повышенной интенсивностью сигнала, где чувствительность мониторинга повышается на 15–20 дБ.

Явления волноводной дисперсии и сжатия широкополосного сигнала в морском волноводе были экспериментально исследованы на примере распространения акустических волн в условиях мелкого моря. Было показано, что акустический сигнал в частотной полосе от 7 до 15 кГц может быть сжат более чем в 4 раза на дистанции 3,8 км. При этом распространение сигнала в волноводе характеризовалось, как одномодовое [3].

2. ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ПА НА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ

ПА в силу своих особенностей к селективному возбуждению мод волноводов в широкой полосе частот представляется наиболее эффективным инструментом для исследований компрессии акустических сигналов в морских волноводах и проведения гидрофизических исследований на протяженных трассах. Внешний вид разработанной для этих целей параметрической антенны и многоканальной системы усиления электрических сигналов для ее возбуждения показан на рис. 3.

Этот новый инструмент, действующий на принципах нелинейной акустики, предоставляет возможность проводить исследования на протяженных трассах в широкой полосе частот при одномодовом волноводном распространении. С помощью разработанной параметрической антенны предполагается организовать стационарные акустические трассы для исследования гидрофизических характеристик Черного моря. Разработанная мощная параметрическая антенна находится в Сухумском гидрофизическом институте Абхазской АН. Ее возможности позволяют исследовать гидрофизические характеристики Черноморского полигона в акватории от кавказских берегов Черного моря до Крыма на трассах, протяженностью свыше 500 км.

Предварительные испытания, выполненные на полигоне Сухумского гидрофизического института, позво-



Рис. 3: Гидроакустическая параметрическая антенна для гидрофизических исследований на протяженных трассах. Слева — 24-канальный усилитель мощности антенны. Мощность каждого канала — 6 кВт

лили определить приведенный уровень параметрического излучения сигнала разностной частоты. На частоте 1 кГц он оказался равным 205 дБ относительно 1 мкПа·м при полной мощности накачки. Расчеты показывают, что низкочастотные сигналы такого уровня могут обеспечить эффективное зондирование морской среды на дистанциях сотни километров в условиях волноводного распространения. При этом приведенный уровень излучения накачки на частоте 20 кГц составил $2,5 \times 10^6$ Па·м или 248 дБ относительно 1 мкПа·м.

Измерение скорости распространения звука вдоль протяженной трассы позволит изучить один из типично акустических эффектов подводного волновода — модовую дисперсию. Модовая дисперсия в подводном волновом канале означает, что моды одного и того же номера имеют различную групповую скорость распространения на различных частотах. Поэтому широкополосные сигналы меняют свою форму в процессе распространения, и это изменение может быть экспериментально зафиксировано. Измерение групповой скорости позволит определить средний профиль скорости звука в подводном волноводе и обеспечить мониторинг холодного промежуточного слоя в Черном море. Схемы трасс, наиболее перспективных для акустического мониторинга Черного моря показаны на рис. 4.

Еще более существенным влияние дисперсии на распространение акустических сигналов в широкой полосе частот возможно при распространении в условиях Баренцева моря. Моделирование условий применения параметрической антенны в условиях Баренцева моря, указывает на принципиально новые возможности гидроакустических методов освещения подводной обстановки на обширных мелководных акваториях. В работе [7] показано, что при распространении по трассе Новая Земля—Шпицберген одномодовый сигнал в полосе 100–400 Гц может быть сжат более, чем в 60 раз

при соответствующем росте интенсивности. Эта новая возможность концентрировать энергию излучения на больших дистанциях позволяет формировать в акватории удаленные виртуальные акустические рубежи, на которых обеспечивается высокое соотношение сигнал/шум, что важно для прецизионного гидрофизического мониторинга в этих условиях (рис. 5). Такая возможность реализуется с помощью параметрической антенны, которая, благодаря острой характеристике направленности, позволят осуществлять селективное возбуждение отдельных мод морского волновода в широкой полосе частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Области применения высоконаправленной мощной широкополосной излучающей параметрической антенны стационарного типа могут быть достаточно разнообразны. Параметрическая антенна, благодаря высокой направленности излучения в широкой полосе частот, может быть перспективным инструментом, способным предоставить исследователю новые возможности для акустического зондирования в океане, особенно в морском волноводе. Высокая направленность параметрического излучения позволяет применить эту антенну для исследования характеристик самого морского волновода. В частности, для определения профиля скорости звука в подводном звуковом канале наиболее информативной является дисперсия нижних мод. Методы нелинейной гидроакустики теперь предоставляют исследователям возможность для селективного возбуждения мод в широкой полосе частот (2–3 октавы), и при этом широкополосный сигнал оказывается идеально согласованным со слоистой структурой морской среды.

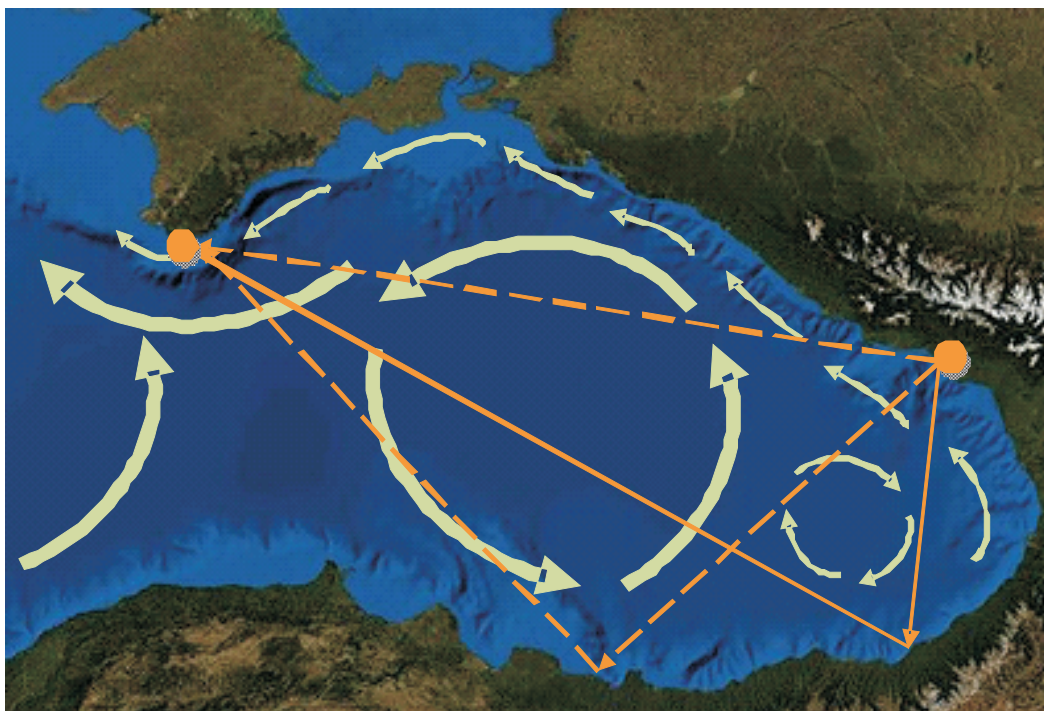


Рис. 4: Схема перспективных трасс для мониторинга Черного моря. Стрелки — направления течений

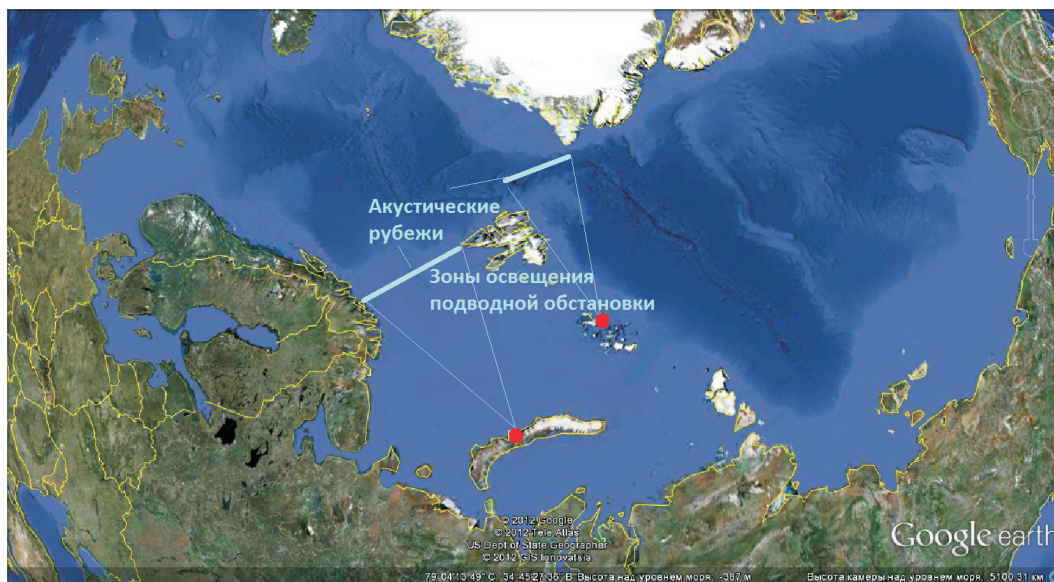


Рис. 5: Схема формирования акустических рубежей в Арктике

Это качество ПА представляется наиболее важным для гидрофизических исследований в Арктике [8]. Наиболее крупным современным проектом развития акустических средств исследования Арктики является проект АСОВАР (Acoustic Technology for Observing the interior of the Arctic Ocean) [9,10]. Этот проект предполагает разработку системы мониторинга окру-

жающей среды в Северном Ледовитом океане с помощью обобщения данных, получаемых акустическими методами, включая томографию, данных, получаемых с подводных платформ, а также с помощью подледной навигации и связи с буями и глайдерами. Сопоставляя схемы на рис. 5 и рис. 6, становится очевидным, что ПА по своим возможностям может существенно

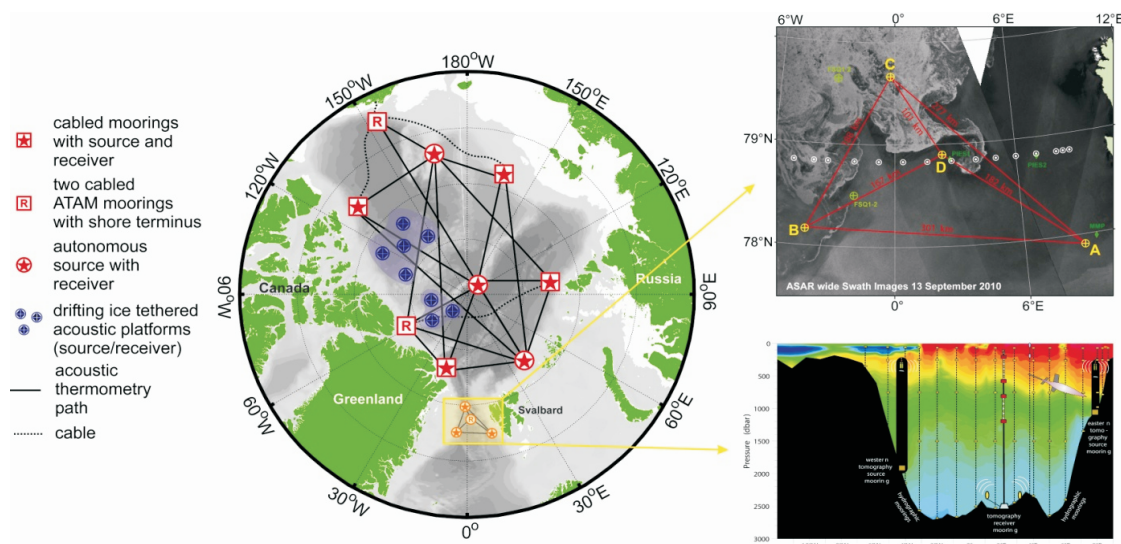


Рис. 6: Перспективная сеть для акустической океанографии, подводной навигации и связи с автономными подводными средствами в Арктике (слева). Вверху справа показана схема расположения многоцелевой акустической системы в проливе Фрама. Слева внизу показано распределение температуры по сечению пролива (красным цветом показаны теплые воды Атлантики, синим — холодные воды Арктики), полученное с помощью этой системы

дополнить перечень решаемых задач в Арктике.

Таким образом, излучающая параметрическая антенна, согласованная с морским волноводом, в силу своих особенностей открывает возможность методам нелинейной акустики включить в гидроакустическую практику частотную область волновода. Это новое качество создает дополнительные возможности для мониторинга морских акваторий на протяженных трассах. Селективное возбуждение мод в широкой полосе частот в волноводах представляется наиболее эффективным инструментом для исследований компрессии акустических сигналов в океанических волноводах, реализации виртуальных акустических барьеров, построения систем подводной навигации и управления движением малоразмерных автономных подводных аппаратов, создания высокоэффективных систем зондиро-

вания океана с целью обнаружения погруженных объектов и неоднородностей.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке Международного научно-исследовательского центра (проект МНТЦ 3770) и РФФИ (проект РФФИ 13-02-90300). Параметрическая антенна была разработана в Акустическом институте имени Н. Н. Андреева совместно с Таганрогским технологическим институтом при сотрудничестве с Nansen Environmental and Remote Sensing Center (NERSC) в г. Берген (Норвегия) и Foundation for Research and Technology–Hellas (FORTH), Institute of Applied & Computational Mathematics, г. Гераклион (Крит, Греция). Морские испытания антенны были выполнены в Сухумском гидрофизическом институте

- [1] Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. (Л.: Судостроение, 1981). 264 с.
- [2] Esipov I. B., Tarasov S. P., Voronin V. A., Popov O. E. Nonlinear Acoustics — Fundamentals and Applications, 18-th International Symposium on Nonlinear Acoustics. (Stockholm, Sweden, 7–10 July 2008). P. 393.
- [3] Esipov I. B., Попов О. Е., Воронин В. А., Тарасов С. П. Акуст. журн. **55**, № 1. С. 56. (2009).
- [4] Чарнотский М. И., Фукс И. М., Наугольных К. А., Смирнов А. В., Ди Йорно Д., Esipov I. B. Акуст. журн. **52**, № 2. С. 269. (2006).
- [5] Бреховских Л. М. Океан и человек. Настоящее и будущее. (М.: Наука, 1987). 304 с.
- [6] Бреховских Л. М., Лысанов Ю. . Теоретические основы акустики океана. (Л.: Гидрометеониздат, 1982). 264 с.
- [7] Esipov I. B., Тарасов С. П., Чулков В. Л. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. **7**, № 2. С. 46. (2014).
- [8] Esipov I. B., Иоханнессен О. Н., Наугольных К. А., Уанг Ю. Ю., Шанг И. С. Акуст. журн. **45**, С. 504. (1999).
- [9] Mikhalevsky P. Basin-Wide High Arctic Acoustic Network — status and possibilities. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. (Corfu, Greece, 2013). С. 325.
- [10] ACOBAR Project <http://acobar.nersc.no>.

Aspects of nonlinear acoustics methods for hydrographical research at the alonged paths**Igor B. Esipov^{1, a}, Oleg E. Popov², Ivan I. Sizov³**¹*Russian state university of oil and gas by I.M. Gubkin, Physics chair, Leninsky prosp. 65, Moscow, 119991, Russia*²*Acoustics institute, Shvernik str. 4, Moscow, 117036, Russia*³*Hydrophysical institute, Sukhum, Abkhazia**E-mail: ^aigor.esipov@mail.ru*

Results of the test of power parametric array at the marine range of the Hydrophysical research institute in Sukhum (Abkhazia) are presented in the paper. Methods of nonlinear acoustics are discussed for hydrographical research, which appeared when sharp directed wide frequency band acoustical signal from parametric array will be fitted to frequency pattern of the marine waveguide. Results of the research show the single mode marine waveguide excitation by parametric array in the wide frequency band are obtained. The ability to compress the wide frequency band acoustical signal under its propagation due to waveguide dispersion is shown. This compression leads to increase the signal-to-noise ratio. Some aspects of sharp directed parametric array application for hydrographical research at the Black sea and in Arctic are considered as well.

PACS: 43.25.Lj, 43.30.Bp

Keywords: parametric array, waveguide dispersion, single mode sound propagation.

Received 10.11.2014.

Сведения об авторах

1. Есипов Игорь Борисович — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор на кафедре физики РГУ нефти и газа; тел.: +7 (915) 160-87-40, e-mail: igor.esipov@mail.ru.
2. Попов Олег Евгеньевич — научный сотрудник Акустического института, e-mail: olegp@mail.ru.
3. Сизов Иван Иванович — канд. физ.-мат. наук, начальник отдела Сухумского гидрофизического института АН Абхазии; e-mail: siziv@yandex.ru.