



ГА-2022

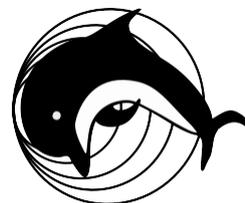


ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

**«ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
ГИДРОАКУСТИКИ И ГИДРОФИЗИКИ»**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФИЛИАЛ
ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ им. П. П. ШИРШОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



ГА-2022
~~~~~

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ГИДРОАКУСТИКИ И ГИДРОФИЗИКИ»**

УДК 551.046.0+551.463.2 Т78

**Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики».** — СПб. : Издательство «ЛЕМА», 2023 — 492 с.

**ISBN 978-5-00105-780-2**

В сборнике трудов представлены доклады о достижениях отечественных и зарубежных ученых в области гидрофизики и гидроакустики. Особое внимание уделено результатам фундаментальных исследований и их внедрению при решении прикладных проблем, в том числе при разработке технологий мониторинга Мирового океана с целью исследования и освоения его ресурсов, предупреждения природных катастроф и чрезвычайных ситуаций, при изучении рельефа прибрежных акваторий и экономических зон, при обосновании методов и средств борьбы с подводным терроризмом и минной опасностью, при разработке датчиков и систем контроля и управления техногенными процессами.

Для научных работников и инженеров, а также для широкого круга специалистов, интересующихся подводной акустикой и гидрофизикой.

Конференция проводилась с 14 по 16 сентября 2022 г.

Доклады публикуются в редакции авторов.

Оригинал-макет изготовлен в Санкт-Петербургском филиале Института океанологии РАН.

#### ОРГАНИЗАЦИИ-СОУЧРЕДИТЕЛИ

Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (СПбФ ИО РАН)

АО «Концерн «Океанприбор»

АО «Концерн «Морское подводное оружие — «Гидроприбор»

Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики  
Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук (СПбНЦ РАН)

#### *Авторы - составители:*

чл.-корр. *А. А. Родионов;*  
д-р физ.-мат. наук *Ф. Ф. Легуша;*  
д-р техн. наук *И. А. Селезнёв;*  
д-р техн. наук *В. В. Малый*

#### *Рецензенты:*

чл.-корр. *А. А. Родионов;* д-р геогр. наук *А. В. Зимин;* д-р техн. наук *В. В. Малый;*  
д-р техн. наук *И. А. Селезнёв;* д-р физ.-мат. наук *Ф. Ф. Легуша;* канд. геогр. наук *А. В. Исеев;*  
канд. техн. наук *В. А. Попов;* канд. техн. наук *Д. А. Никитин;* канд. техн. наук *К. Г. Погудин;*  
канд. техн. наук *Р. Ю. Монахов;* канд. физ.-мат. наук *А. Ю. Дворников;*  
канд. физ.-мат. наук *В. А. Горчаков;* канд. физ.-мат. наук *Л. В. Григорьев;*  
канд. физ.-мат. наук *С. Д. Мартыанов;* акад. *А. А. Клещев*

**ISBN 978-5-00105-780-2**

© Санкт-Петербургский филиал  
Института океанологии  
им. П. П. Ширшова РАН, 2023  
© Издательство «ЛЕМА», 2023

**ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ  
XVI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
«ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИКИ  
И ГИДРОФИЗИКИ»**

**Председатель оргкомитета**

Родионов Анатолий Александрович, член-корреспондент РАН, засл. деятель науки РФ, профессор (ИО РАН, директор Санкт-Петербургского филиала, председатель Научного совета по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики СПбНЦ РАН, Санкт-Петербург)

**Сопредседатель оргкомитета**

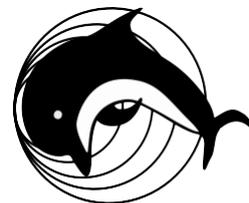
Селезнев Игорь Александрович, д-р техн. наук, доцент (АО «Концерн «Океанприбор», заместитель генерального директора–руководитель приоритетного технологического направления (научный руководитель Концерна), Санкт-Петербург)

**Члены оргкомитета**

Румянцев В. А., советник президиума РАН, СПбНЦ РАН, академик РАН;  
Филатов Н. Н., директор, ИВПС КарНЦ РАН, член-корреспондент РАН;  
Боровская А. В., ведущий специалист, СПбФ ИО РАН;  
Вертешев С. М., президент, Псковский политехнический университет, д-р техн. наук, профессор;  
Говорухин В. П., зам. директора, СПбНЦ РАН, канд. техн. наук;  
Григорьев Л. В., доцент, СПбГУ, канд. физ.-мат. наук;  
Гурьев Ю. В., зав. кафедрой механики и гидромеханики ВУНЦ ВМФ ВМА, ВМИИ, д-р техн. наук, профессор;  
Гурьев А. В., ст. науч. сотрудник, СПбФ ИО РАН, канд. техн. наук;  
Долин Л. С., глав. науч. сотрудник, ИПФ РАН, канд. физ.-мат. наук;  
Емельянов В. Н., зав. кафедрой «Плазмогазодинамика и теплотехника», БГТУ «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова, д-р техн. наук, профессор;  
Зенченко С. С., начальник сектора, ФГУП «Крыловский научный центр», д-р техн. наук;  
Зимин А. В., зав. лабораторией, СПбФ ИО РАН, д-р географ. наук, доцент;  
Иванов М. П., зав. лабораторией, СПбГУ, канд. биолог. наук, доцент;  
Ивакин Я. А., зам. директора, АО «Концерн «Океанприбор», д-р техн. наук, профессор;  
Каверинский А. Ю., начальник отделения, АО «ЦКБ МТ «Рубин», канд. техн. наук;  
Кедрова Е. В., начальник отдела, АО «Концерн «Океанприбор»;  
Легуша Ф. Ф., зав. кафедрой, СПбГМТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор;  
Малый В. В., вед. науч. сотрудник, АО «Концерн «Океанприбор», д-р техн. наук, профессор;  
Микушин И. И., доцент, НИЦ РЭВ и ФИР ВМФ НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА», д-р техн. наук;  
Печковский П. Г., зам. ген. директора, АО «Корпорация морского приборостроения», д-р техн. наук;  
Погудин К. Г., ученый секретарь, АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», канд. техн. наук;  
Попов В. А., доцент, АО «Концерн «Океанприбор», канд. техн. наук, доцент;  
Сетин А. И., зав. кафедрой, СПбГМТУ, д-р техн. наук;  
Черницкий В. В., ст. науч. сотрудник, СПбФ ИО РАН, канд. техн. наук, доцент;  
Щеголихин В. П., глав. науч. сотрудник, ЦНИИ КиВ ВУНЦ ВМФ ВМА, д-р техн. наук, профессор.

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

ST. PETERSBURG BRANCH  
OF SHIRSHOV INSTITUTE OF OCEANOLOGY OF RAS



**ГА-2022**



**PROCEEDINGS OF ALL-RUSSIAN CONFERENCE  
«ADVANCED TECHNOLOGIES  
OF HYDROACOUSTICS AND HYDROPHYSICS»**

**Proceedings of All-Russian Conference «Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics».** — St. Petersburg : LEMA, 2023. — 492 p.

The collection of works presents reports on the achievements of domestic and foreign scientists in the field of hydrophysics and hydroacoustics. Special attention is paid to the results of fundamental research and their implementation in solving applied problems, including the development of technologies for monitoring the World ocean for the purpose of research and development of its resources, the prevention of natural disasters and emergencies, the study of the relief of coastal waters and economic zones, the justification of methods and means of combating underwater terrorism and mine danger, the development of sensors and systems for monitoring and managing technogenic processes.

For scientists and engineers, as well as for a wide range of specialists interested in underwater acoustics and hydrophysics.

The conference was held in St. Petersburg from 14 to 16 September 2022.

The Papers publish reports (including drawings, formulas, etc.)  
in the editorial office of the authors of the reports.

The original layout was made in the St. Petersburg branch  
of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences.

#### ORGANIZATIONS CO-FOUNDERS

P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg Department

JSC «Concern «Oceanpribor»

JSC «Concern «Sea Underwater Weapon — Gidropribor»

Scientific Council on Problems of Fundamental and Applied Hydrophysics  
St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

#### *Authors compilers*

*A. A. Rodionov*

*I. A. Seleznev*

*V. V. Malyj*

*F. F. Legusha*

© St. Petersburg Department of the  
P. P. Shirshov Institute of  
Oceanology of the Russian  
Academy of Sciences, 2023  
© LEMA, 2023

**ORGANIZING COMMITTEE  
OF XVI ALL-RUSSIAN CONFERENCE  
«ADVANCED TECHNOLOGIES OF HYDROACOUSTICS AND HYDROPHYSICS»**

**Chairman of the organizing Committee**

Anatoly Rodionov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Honored scientist of the Russian Federation, Professor (IO RAS, Director of the Saint-Petersburg Department, Saint-Petersburg)

**Organizing Committee co-chairman**

Igor Seleznev, Doctor of Technical Sciences, associate Professor (JSC «Concern «Oceanpribor», Deputy General Director–Head of the priority technological direction (Scientific supervisor of the Concern), Saint-Petersburg)

**Members of the organizing committee**

Rumyantsev V. A. (Saint-Petersburg);  
Filatov N. N. (Saint-Petersburg);  
Borovskaya A. V. (Saint-Petersburg);  
Verteshev S. M. (Pskov);  
Govorukhin V. P. (Saint-Petersburg);  
Grigoryev L. V. (Saint-Petersburg);  
Guryev Yu. V. (Saint-Petersburg);  
Guryev A. V. (Saint-Petersburg);  
Dolin L. C. (Nizhniy Novgorod);  
Emelyanov V. N. (Saint-Petersburg);  
Zenchenko S. C. (Saint-Petersburg);  
Zimin A. V. (Saint-Petersburg);  
Ivanov M. P. (Saint-Petersburg);  
Ivakin Y. A. (Saint-Petersburg);  
Kaverinsky A. Yu. (Saint-Petersburg);  
Kedrova E. V. (Saint-Petersburg);  
Legusha F. F. (Saint-Petersburg);  
Malyj V. V. (Saint-Petersburg);  
Mikushin I. I. (Saint-Petersburg);  
Pechkovsky P. G. (Saint-Petersburg);  
Pogudin K. G. (Saint-Petersburg);  
Popov V. A. (Saint-Petersburg);  
Setin A. I. (Saint-Petersburg);  
Chernilsky V. V. (Saint-Petersburg);  
Shchegolikhin V. P. (Saint-Petersburg).

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

### ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИКИ И ГИДРОФИЗИКИ. ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

*A. A. Rodionov*<sup>1,2</sup>, чл.-корр. РАН

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

### APPLIED TECHNOLOGIES IN HYDROACOUSTICS AND HYDROPHYSICS. PROBLEMS AND RESEARCH DIRECTIONS

*A. A. Rodionov*, corresponding member of RAS

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg Scientific Center of the RAS, St. Petersburg, Russia

*В докладе проанализированы итоги проведения предыдущих конференций. Сделан краткий обзор информации по состоянию и перспективным направлениям развития гидроакустики, гидрофизики и обеспечивающих отраслей науки и техники. Более подробно представлены результаты исследований субмезомасштабных процессов и явлений в океане, оказывающих влияние на эффективность применения средств подводного наблюдения.*

*The report presents the analysis of the previous conferences results. A review of the state of the art and perspective directions of development in hydroacoustics, hydrophysics and supporting areas of science and technics is made in brief. The results of studies of submesoscale processes and phenomena in the ocean that affect the effectiveness of underwater observation tools use are presented in details.*

Научно-техническая конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» проводится с 1993 г. — уже около 30 лет. За это время частично менялось название конференции, уточнялась тематика, но главное — всегда были и остаются активные участники и организаторы, которые вкладывают душу и свою энергию в её жизнь.

Цель конференции — развитие фундаментальных, поисковых и прикладных исследований и разработок в области гидрофизики, анализа достоверности, научной и практической значимости результатов участников, обмена информацией по актуальным проблемам между научной общественностью Санкт-Петербурга и других регионов России, а также зарубежных научных центров.

К настоящему времени сложились следующие тематические направления конференции:

- технологии гидроакустики и гидрофизики для мониторинга Мирового океана;
- динамика и гидродинамика морских мобильных объектов;
- физические поля морских объектов и их взаимодействие;
- гидроакустические и гидрофизические преобразователи, датчики и антенные системы;
- методы и средства экологических исследований акваторий;
- гидробионика и биоакустика.

Постоянными участниками конференции являются:

- Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики;
- АО «Концерн «Океанприбор»;
- АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»;
- Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Санкт-Петербургский филиал;
- Институт прикладной физики РАН;
- АО «ЦКБ МТ «Рубин»;

- АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»;
- АО «СПМБМ «Малахит»;
- Институт проблем морских технологий ДВО РАН;
- Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН;
- Санкт-Петербургский Государственный университет;
- Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет;
- Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет;
- Институт автоматики и электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН);
- Крыловский государственный научный центр;
- ФГУНПП «Севморгео»;
- ФГУП «ВНИИФТРИ»;
- АО «Морские неакустические комплексы и системы»;
- ЗАО «Аквамарин»;
- НИЦ РЭВ ВМФ МО РФ;
- Военно-морская академия МО РФ;
- ГНИНГИ МО РФ;
- ООО КБ морской электроники «Вектор», Таганрог.

Всего на конференциях ГА-1993–ГА-2020 состоялось около 1700 докладов; приняли участие более 2300 человек. Число организаций-участников возросло с 15 до 70. На ГА-2022 представлено: 98 докладов, участвуют около 100 докторов и кандидатов наук. В последние 10 лет возросло количество молодых участников. Повторяемость присутствия — 60–70%.

На рис. 1 показана статистика проведения конференции с момента зарождения и до настоящего времени. Рост показателей конференции замедлился в 2020 и 2022 гг. Это объективно связано с разразившейся в 2019 г. эпидемией и «уходом» научного общения в «online режим», из которого многие специалисты пока не вернулись.

Проблемные вопросы и основные направления исследований и создания технологий в области гидроакустики и гидрофизики приведены в табл. [1–3].

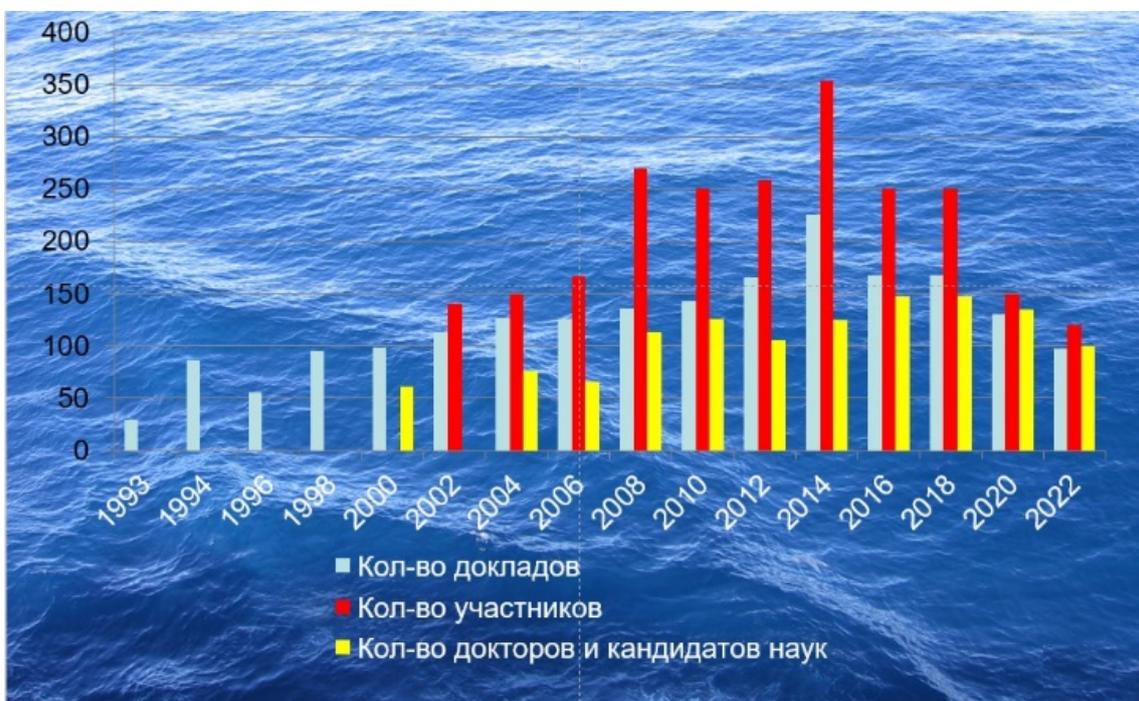


Рис. 1. Статистика Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики».

Проблемные вопросы и основные направления исследований  
и создания технологий в области гидроакустики и гидрофизики

| № п/п | Основные направления                                                                                                                         | Научно-технический задел                                                                  | Ожидаемые результаты                                                                 |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | Фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования в области гидромеханики океана и сопредельных сред.                           | Отдельные статьи.                                                                         | Обобщённая нелокальная гидромеханика.                                                |
| 2.    | Фундаментальные и прикладные исследования процессов и явлений на стыке гидродинамики и гидроакустики.                                        | Труды конференций, отдельные статьи.                                                      | Теория и прикладные методы и методики.                                               |
| 3.    | Проведение исследований и отработка технологий оперативной океанографии в интересах решения прикладных задач.                                | НИОКР по заказу МО РФ (сложный путь).                                                     | Система в интересах ВМФ.                                                             |
| 4.    | Развитие методов согласованной со средой обработки информации в гидроакустике и гидрофизике.                                                 | НИОКР по заказу МО РФ, ФПИ.                                                               | Реализация методов при создании и применении средств.                                |
| 5.    | Разработка комплексных распределённых в пространстве методов экспериментальных исследований и решения прикладных задач, в т.ч. на полигонах. | Отдельные экспериментальные работы с применением авиакосмических и позиционных носителей. | Внедрение в практику экспериментальных работ. Создание специализированных полигонов. |
| 6.    | Разработка перспективных гидроакустических и гидрофизических средств измерений и обнаружения локальных и распределённых объектов.            | НИОКР по заказу МО РФ, Минпромторга.                                                      | Экспериментальные макеты, опытные образцы, серии.                                    |
| 7.    | Обоснование методов принятия управленческих решений и оценки эффективности комплексных морских систем решения прикладных задач.              | Отдельные НИОКР.                                                                          | Интеллектуальные системы принятия решений.                                           |

Перечень вопросов, приведенных в таблице не полон. Он должен быть расширен и уточнен в ходе работы конференции. Но необходимо сделать одно важное замечание. Исследования процессов и явлений в океане проводятся на различных пространственно-временных масштабах. Наиболее изучены крупные и мезомасштабы. Вместе с тем значительное влияние на закономерности эволюции гидрофизических полей и на решение прикладных задач в океане оказывают субмезомасштабы (по пространству — десятки метров ÷ единицы километров: по времени — от единиц минут до единиц часов). В силу ряда объективных обстоятельств они наименее изучены. Поэтому необходимо проведение их целенаправленных исследований.

По решению нашей конференции с 2008 г. издается журнал «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» (рис. 2). В 2013 г. журнал стал академическим – издается под руководством Отделения наук о Земле РАН. Периодичность издания журнала 4 раза в год. Журнал включен в список ВАК, входит в ядро РИНЦ, индексируется в базах RSCI и Scopus. По настоящее время вышло в свет 46 номеров, из них более 20 тематических выпусков. Издаются специальные выпуски в интересах МО РФ. Показатель журнала в рейтинге SCIENCE INDEX за 2020 г. — 0,764. На рис. 3 приведены графики изменения индекса цитирования журнала по различным реферативным базам.



Рис. 2. Обложка журнала «Фундаментальная и прикладная гидрофизика».

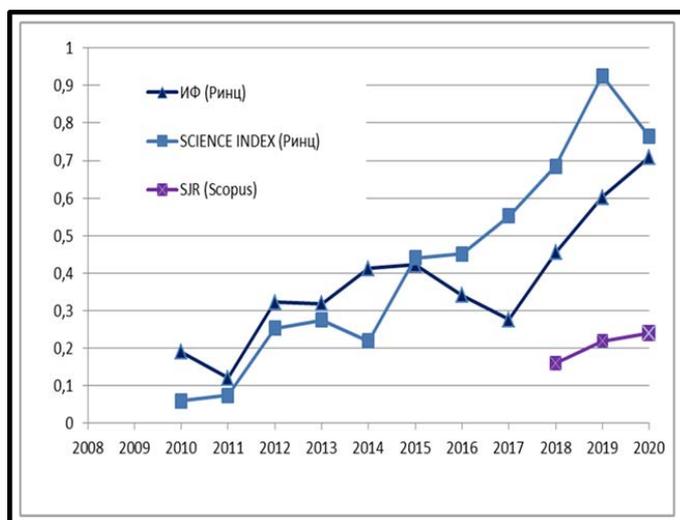


Рис. 3. Графики изменения индекса цитирования журнала «Фундаментальная и прикладная гидрофизика».

На наших конференциях подводятся и обсуждаются итоги научной деятельности, намечаются планы на будущее, рождаются новые идеи и завязываются знакомства, которые часто перерастают в сотрудничество и дружеские отношения. Наш девиз: «Вперед! К новым вершинам науки и техники».

#### *Литература*

1. Труды XIII Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Переплет. Центр, 2016. 516 с.
2. Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ЛЕМА, 2018. 652 с.
3. Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. 600 с.

## ОПЕРАТИВНАЯ ОКЕАНОГРАФИЯ В ЗАДАЧАХ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

*V. V. Kovalenko*, канд. техн. наук, *A. A. Rodionov*, чл.-корр. РАН, *P. E. Vankevitch*, канд. физ.-мат. наук  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

## OPERATIONAL OCEANOGRAPHY IN UNDERWATER SURVEILLANCE TASKS

*V. V. Kovalenko*, Ph.D., *A. A. Rodionov* corresponding member of RAS, *R. E. Vankevitch*, Ph.D.  
Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

*Рассмотрена связь инструментария оперативной океанографии с рядом прикладных задач. Среди задач уделено внимание акустическому подводному наблюдению, оптическим инструментам и моделям, биохимическим процессам и моделям.*

*Interconnection between operational oceanography instrumentation and several applied tasks is considered. Among different tasks significant attention on acoustic underwater surveillance, optical remote sensing instruments and biochemical processes and models is devoted.*

Согласно [1] под **оперативной океанографией** понимается «деятельность, направленная на получение данных о состоянии океана и атмосферы, интерпретацию этих данных и их распространение. Получаемая продукция включает три части. Это: 1) текущие оценки состояния океана; 2) прогноз, обеспечивающий оценивание будущего состояния океанической среды; 3) ретроспективные оценки, позволяющие выделять характерные тренды».

В ряде источников делается акцент на смысл обсуждаемого понятия, придаваемый ему словом «оперативный», которое трактуется как «рабочий», нацеленный на практические приложения. Среди приложений выделяются задачи обеспечения безопасности, экологии, ресурсной деятельности, транспорта и обороны. Составной частью приведенного определения является его распространение на различные по масштабам районы океана и их различные физические свойства. К важному дополнению указанного определения можно отнести то, которое трактует оперативную океанографию, как «новую ветвь современной науки» [2]. Объединение наблюдений и моделей геофизической гидродинамики посредством названных ассимиляцией процедур взаимной подгонки данных и моделей позволяет получить новый продукт в виде трехмерного представления свойств океанической среды. Это новое качество касается и названных выше прикладных аспектов океанологии, и фундаментальных исследований. Значимость оперативной океанографии для фундаментальных исследований заключается в корректировке описывающих реальность моделей, (получения базовых знаний).

**Концептуальные представления. Общая схема.** Представление о составе систем оперативной океанографии с элементами настройки моделей и наблюдательной сети приведено на рис. 1.

Эти системы состоят из трех частей: 1) наблюдательная сеть, функцией которой является получение натуральных данных о состоянии океанической среды и атмосферном форсинге; 2) физическая модель, описывающая изменчивость океанической среды и атмосферы; 3) механизм подгонки натуральных данных и модели, называемый ассимиляцией. Таким образом, **входом** в систему являются наборы или поля измеренных данных и данных о воздействующих факторах. **Выходом** системы являются поля океанических характеристик, информация о которых востребована приложениями.

Основанная на использовании инструментария оперативной океанографии, схема комплексной системы [3], обеспечивает различные приложения. В соответствии с ней физические модели связаны с акустическими моделями, с моделями изменчивости оптических свойств, с моделями экосистем и с внешними факторами в виде атмосферного форсинга. Акустические и оптические модели (модели распространения звука и света) связываются с изменчивостью физических свойств среды. Оптические модели связываются также с биохимическими моделями и транспортом вещества. Последние связываются с акустикой (рассеивающие свойства) и непосредственно с физическими моделями. Необходимо упомянуть важный для приложений и получения фундаментальных знаний ряд моделей. Это: волновые модели, модели неорганического и органического взвешенного вещества, модель океанической турбулентности и модель транспорта вещества.

## Состав систем оперативной океанографии

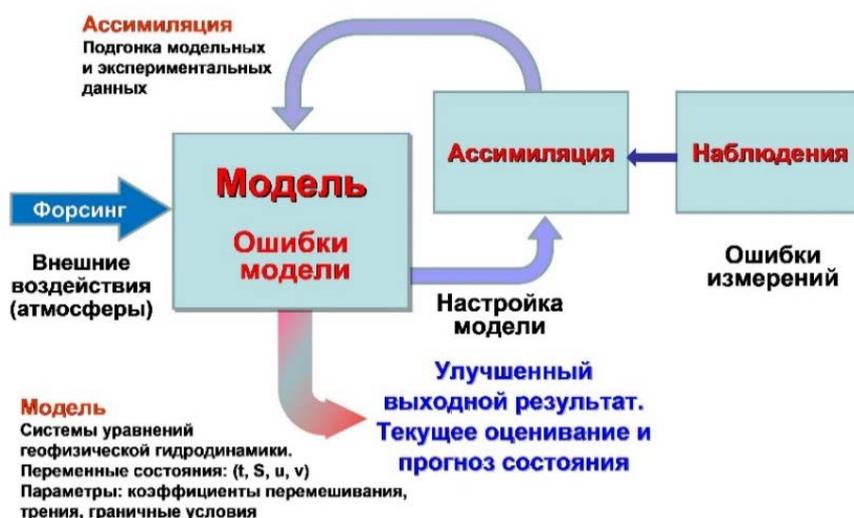


Рис. 1. Состав систем оперативной океанографии с элементами настройки (адаптации) моделей и наблюдательной сети.

На пути к решению конечных задач объединяются модели изменчивости физических свойств океанической среды и модели, описывающие прикладную область. Такими прикладными моделями могут быть модели экосистем, опасных явлений, модели акустического и неакустического подводного наблюдения. Имеет место связь физической океанографии, акустики и/или оптики (рис. 1). В этой составной системе представлена цепочка зависимостей: от состояния среды до показателей наблюдателя.

Океаническая среда будет определять акустические и оптические поля, в том числе фоновые поля, представляющие в задачах подводного наблюдения помеху. Для акустики фоновые поля представлены пространственно-временным распределением окружающего шума и реверберации. Для оптики это пространственно-временное распределение неоднородностей, поглощающих и рассеивающих свет, т.е. это изменяющееся под воздействием свойств океанической среды распределение органического и неорганического вещества и состояние поверхности моря. Тракт наблюдения, будет иметь показатели, зависящие от состояния среды. Тракты наблюдения можно оптимизировать, но для этого необходимо знать состояние среды. Оценки пространственно-временной изменчивости состояния среды в представляющих интерес районах океана призвана дать система оперативной океанографии (СОО). Возникает один из ключевых вопросов о качестве СОО-оценок применительно к конкретной задаче.

Несоответствие оценок СОО истинному состоянию среды называют неопределенностью, которая имеет количественное выражение, как правило, в виде статистических показателей расхождения оценочных и истинных значений. Эти показатели изменяются в пространстве и времени, а 3D — изменчивость неопределенности представляется полями этих величин. Рис. 2 иллюстрирует распространение неопределенности в цепи «состояние океана – наблюдатель» с обратными связями — от решателя задачи к качеству океанологической информации. Очевидно, что высокая степень неопределенности приводит к невозможности решения конечной задачи. Отсюда выводы: 1) создавать следует только системы, отвечающие требованиям пользователя; 2) создавать системы без ориентации на приложения нерационально; это сопровождается риском их низкой прикладной значимости.

**Неопределенности и меры по их уменьшению.** Согласно [4] имеется несколько источников неопределенностей. **Первый.** Упрощение моделей. **Второй.** Неопределенности возникают из-за неполного знания или не учета процессов внутри принятого «окна масштабов». **Третий.** Для инициализации модели и оценивания параметров требуются данные измерений, которые обычно ограничены по покрытию и точности. **Четвертый.** Модели взаимодействий между океаном и атмосферой являются приближенными. **Пятый.** Неопределенности из-за численной интерпретации.

$\sigma$  – неопределенность (оценок полей скорости звука «С» и потерь на распространение «TL»)



Рис. 2. Функциональные схемы акустического наблюдения с обратными связями от элементов наблюдения к системе оперативной океанографии и с обозначением распространения неопределенностей (стандартного отклонения « $\sigma$ » невязок модельных и натурных данных).

В работе [4] описан пример оценок полей температуры и оценок неопределенности в процессе эксперимента. Эксперимент включал акустические исследования на выделенной трассе. Для района было получено распределение ошибок оценок состояния среды, влияющих на качество акустического наблюдения. Местами ошибки, выраженные в значениях температуры, признаны существенными.

Изменчивость среды и неопределенность оценок связаны между собой, но различны. Часть изменчивости, которая приносит ошибки, вкладывается в неопределенность. Изменчивость, которая не разрешается, также превращается в неопределенность. Это значит, что в изменчивой в широком окне масштабов по пространству и времени среде при редкой выборке данных и большом количестве параметров, сильная неопределенность неизбежна. В этих условиях имеет место распространение неопределенности до наблюдателя. Здесь следует отметить вклад в итоговую неопределенность оценок состояния среды частных неопределенностей: атмосферного форсинга, рельефа и физических свойств дна и неопределенностей, вносимых измерениями. Таким образом, качество ориентированных на приложения систем ОО определяется качеством моделей и качеством наблюдений.

К мерам по улучшению качества моделей относят снятие упрощений в отношении физических явлений при численном решении уравнений гидродинамики и введение параметризации эффектов, находящихся за пределами «окна масштабов». Важным видом параметризации является та, что осуществляется в отношении суб-мезомасштабных явлений [5]. Параметризации коэффициентов донного трения с оценками соответствующих эффектов в условиях мелкого моря посвящена работа [6]. Согласно этой работе, указанные коэффициенты-параметры для условий мелкого моря являются определяющими.

К параметрам иногда относят граничные условия. Прямое инструментальное их определение в большинстве случаев невозможно. Поэтому граничные условия определяются либо путем использования информации от внешних систем, либо в процессе решения задачи оценки граничных условий, как параметров, с использованием информации от измерителей внутри района. При обычно имеющей место ограниченной по объему выборке натуральных данных такая постановка обратной задачи является некорректной. В изменчивой по пространству и времени среде и при неизбежном наличии невязок между модельными и измеренными значениями определять указанным способом граничные условия становится невозможным.

Упомянутые выше внешние системы — это системы, работающие в больших по площади акваториях с явлениями более крупных масштабов. Важной особенностью систем оперативной океанографии является их иерархическая организация. Иерархия создается в виде сопряженных и вложенных одна в другую систем. Сопряжение систем и моделей разных классов при реализации принципа вложенности осуществляется таким образом, чтобы граничные условия для работы региональных моделей получались из глобальных (более крупномасштабных), а для работы локальных — из региональных. Локальное моделирование областей океана с открытыми границами без привлечения информации о крупномасштабной изменчивости с попыткой определить все параметры модели (включая граничные условия) на основе решения обратной задачи принципиально не учитывает существующих неопределенностей. Для решения задачи уменьшения неопределенности необходимы:

- разработка динамических моделей океана в общем случае, как **вложенных** одна в другую, где модели, предназначенные для описания крупномасштабных структур, вырабатывали бы необходимую входную информацию для моделей, описывающих более мелкие структуры;
- исследование и анализ влияния разномасштабных процессов на работу системы вложенных моделей, определение полей неопределенностей, вызванных влиянием различных процессов;
- создание инструмента идентификации причин неопределенностей;
- создание объединенной системы: океанологические модели – модели морского дна — акустические и оптические модели; сквозное исследование чувствительности характеристик наблюдателя к океаническим явлениям соответствующих приложениям масштабов; оценка акустических и оптических неопределенностей;
- создание средств измерения океанологических характеристик, данные от которых можно было бы использовать для уменьшения указанных выше неопределенностей; синтез оптимальных измерительных сетей;
- синтез оптимальных процедур и средств усвоения океанологических данных;
- синтез робастных процедур при оптимизации различных показателей качества при подгонке моделей и экспериментальных данных.

К важным мерам по снижению неопределенности относят, так называемые, «адаптивное моделирование» и «адаптивную выборку» данных [4]. Смысл «адаптивного моделирования» заключается в подстройке моделей путем изменения параметров в выявленных зонах повышенной неопределенности. В процессе работы СОО при выявлении областей повышенной неопределенности применительно к ним вводятся и перебираются модели с различной параметризацией. Методика выявления областей повышенной неопределенности является существенным элементом работоспособных СОО. Второй из упомянутых выше мер уменьшения неопределенности является «адаптивная выборка» натуральных данных. В [7] отмечается проблематичность иметь представительную выборку натуральных данных. В связи с этим предложена процедура насыщения измерениями именно тех областей среды, в которых выявлялась повышенная неопределенность. На рис. 2 эта процедура показана в виде обратной связи от выходного результата к выборке данных. Заслуживает внимания использование робототехники, как средства улучшения детализации измерений в зонах повышенной неопределенности. В характерном для натуральных данных наборе ошибок отмечаются следующие виды. Это: ошибки измерений, ошибки, привносимые обработкой, ошибки, вследствие редкой выборки короткопериодных и быстрых процессов.

**Про ассимиляцию подробней.** В соответствии с работой [8] ассимиляцией названо объединение моделей и наблюдений с **обязательным учетом неопределенностей** (и моделей, и данных). Выходным результатом СОО должна быть оценка состояния океанической среды в заданный момент времени и **прогноз**. Указанные оценки должны сопровождаться характеристиками неопределенности, как индикаторами их качества. Важно отметить следующее.

Оценивание состояния среды должно осуществляться не только путем объединения моделей, наблюдений и статистик ошибок, но и априорной информации. Важность этого положения следует из того, что при высокой неопределенности моделей и наблюдений состоятельного решения может не достигаться. Уточняется смысл ассимиляции данных.

Ассимиляция при наличии априорной информации используется при решении следующих задач: 1) оценка начального состояния среды для последующего прогноза; 2) калибровка и валидация систем наблюдения; 3) конструирование систем наблюдения; 4) реанализ; 5) лучшее понимание действующих факторов.

Текущее оценивание состояния среды является основой для последующих прогнозов в качестве начальных, привязанных к определенному моменту времени, условий. Для ряда задач оно является наиболее значимой процедурой. Возникает важный вопрос о том, каким образом можно восстановить детальную картину начального состояния изменчивой среды в районе с открытыми границами. От ответа на этот вопрос будет зависеть и качество текущего оценивания, и качество прогноза. Только по данным, полученным внутри района, этого сделать нельзя. Опора на извне полученные данные о граничных условиях и последующее моделирование — тоже несостоятельна из-за грубости картины, т.е. больших ошибок. Ответ на поставленный вопрос ищется в том, чтобы задачу определения начальных и граничных условий и оценки состояния среды решать, как задачу корректировки указанных грубых оценок по информации, получаемой внутри района. Информации, получаемой от крупномасштабных систем, придается смысл априорной. Оцениваются ошибки этого априорного знания. И модели, и измерительная система внутри района рассчитываются на детальное воспроизведение океанических характеристик и также сопровождаются оценками неопределенности.

**Реально-временной характер работы СОО, как ключевая проблема.** Системы ОО должны работать в реальном времени, понимаемом, как способность решать задачи в темпе природной изменчивости тех характеристик океанической среды, которые влияют на показатели решаемых задач. В максимальной степени это требование относится к текущему оцениванию состояния среды. Оперативный характер работы систем означает, что все составные части таких систем и сопряженные с ними подсистемы должны иметь реально-временной характер работы. В этом смысле говорят об «оперативных моделях», оперативном сборе натурных данных, оперативной ассимиляции, оперативном характере совместных моделей различных сред. Исходя из указанных требований, ключевой проблемой оказывается реально-временной режим работы технических средств.

Важно понимать, что оперативные оценки являются компромиссом между тем, что возможно с научной точки зрения и оперативной необходимостью. Прогресс в исследованиях позволяет двигаться в сторону более высокого разрешения и большей содержательности основанных на физике численных моделей и процедур оценивания. В то же время имеются идущие от задач требования к оперативности получения океанологического продукта в части скорости и площади охвата. И при этом имеются ограничения по возможностям сетей связи и вычислительных ресурсов. Признано [9], что эти противоречивые тенденции являются движущим фактором изменений в системах наблюдения, как в части моделей, так и в части технических средств. К имеющим место изменениям в части технических средств можно отнести развитие сетевых систем связи и распределенных вычислительных ресурсов. В связи с обсуждаемым вопросом можно привести сформированную в США программу моделирования океана, которая предусматривает исследования и разработки новых систем оценивания состояния океана в иерархии масштабов от глобального до прибрежного.

Важным аспектом подходов к решению обсуждаемой проблемы является концепция самой оперативной деятельности. Сравнительно недавно фокус оперативной океанографической поддержки сместился от условий глубокого океана к условиям мелководных прибрежных морей. В связи с этим сложность подлежащих решению задач увеличилась. В этих условиях и концепция операций, и концепция соответствующей океанографической поддержки претерпели существенные изменения. Концепция была названа «сетевидной поддержкой» и отражала структуру цикла принятия решения в условиях развития сетевых технологий. Еще до разработки указанной концепции понимание необходимости высокопроизводительных ресурсов привело к ориентации на использование суперкомпьютерной техники и формирования распределенных вычислительных ресурсов. К тому же было понимание того, что доведение информации до конкретных платформ — участников выполнения миссий сопровождалось рядом дополнительных проблем. Решение искалось в области сетевого, распределенного оценивания состояния океана.

Оставалась еще важная проблема поддержки подводных платформ [10]. Согласно указанному источнику, была поставлена задача оснащения этих платформ собственными системами океанографической поддержки, которые учитывали бы специфику их применения. Очевидно, существует проблема передачи больших объемов информации на подводные платформы. Такие системы океанологической поддержки были созданы, но они имели меньшие возможности по сравнению с теми, которыми обладали региональные центры. При этом цикл принятия решений, использующих информацию об океане, был спущен на уровень флота. Многообещающим оказалось применение необитаемых аппаратов.

При наличии наблюдений непосредственно на театре и при наличии сети широкополосной связи вычислительные корабельные системы оказались способными ассимилировать информацию и вырабатывать локальные прогнозные оценки.

**Особенности систем оперативной океанографии для приложений.** Из вышеизложенного следует, что повышение эффективности систем подводного наблюдения можно осуществить путём адекватного учёта текущего и ожидаемого состояния среды. Оптимальное размещение средств подводного наблюдения и получаемый от этого эффект является примером успешного применения такой технологии. Подсистемы получения текущих и прогнозных знаний могут носить характер функциональных элементов сложных систем. Примером является технология согласованной с полем обработки акустических сигналов для локализации объектов в водном слое. Решения обеих из указанных задач (оптимизации размещения средств и согласованной обработки) требуют высокой разрешающей способности, согласованной с пространственной и временной изменчивостью среды. При этом, показатели неопределенности оценок должны позволять получение выигрыша в эффективности. По существу, одновременно с высоким пространственным разрешением необходима способность воспроизведения значимых для решаемой задачи физических процессов и достижения приемлемой неопределенности оценок.

**Заключение.** Развитие систем подводного наблюдения подошло к этапу, когда новое их качество может быть приобретено только путем использования достаточно детального текущего и прогнозного знания состояния океанической среды на больших площадях и распределенного характера сенсоров акустических и гидрофизических полей. Указанное качество не может быть приобретено путем использования баз данных и локальных измерителей профилей скорости звука. Это обстоятельство требует создания в России национальной системы оперативной океанографии, обладающей свойствами, которые удовлетворят задачам подводного наблюдения. Не любая система оперативной океанографии будет обладать такими свойствами.

#### *Литература*

1. What is Operational Oceanography? <http://eurogoos.eu/about-eurogoos/what-is-operational-oceanography/>.
2. Коротяев Г. К. Оперативная океанография — новая ветвь современной океанологической науки // Вестник РАН. Т. 88, № 7. 2018. С. 579–588.
3. Lermusiaux P. F., Haley P. J. et. al. Harvard Research and Plans // Adaptive Sampling and Prediction. Электронный ресурс: <http://www.deas.harvard.edu/~pierrel>
4. Lermusiaux P. F. Quantifying uncertainties in ocean predictions. Oceanography. Vol. 19, № 1. 2006.
5. Scott Harper AESOP: Assessing the Effects of Sub-mesoscale Ocean Parameterizations ONR 2006. Электронный ресурс: <http://slideplayer.com/slide/4660934/>.
6. Mayo T., Butler T., Dawson C., Hoteit I. Data assimilation within the Advanced Circulation (ADCIRC) modeling framework for the assimilation of Manning's friction coefficient // Ocean Modeling. 2014. Vol. 76.
7. Ding Wang, Lermusiaux P. F. J., Haley P. J., Leslie W. G., Schmidt H. Adaptive Acoustical-Environmental Assessment for the Focused Acoustic Field-05 At-sea Exercise // Proc. IEEE/MTS Ocean's Conference. 2006.
8. Lermusiaux P. F. J. et. al. Progress and Prospects of US Data assimilation in Ocean Research // Oceanography. Vol. 19, № 1. 2006.
9. Burnett W., Harper S., Preller R., Jacobs G., LaCroix K. Overview of operational ocean forecasting in the US Navy: Past, present, and future // Oceanography. 2014. Vol. 27(3). P.24–31.
10. Burnett W., Harding J., Heburn G. Overview of operational ocean forecasting in the US Navy: Past, present, and future // Oceanography. 2002. Vol. 15(1). P.4–12. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2002.31>.

## СОГЛАСОВАННАЯ СО СРЕДОЙ ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНЫХ ЗВУКОВЫХ КАНАЛАХ: СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ, ПЕРСПЕКТИВЫ

А. И. Малеханов<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, В. В. Коваленко<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук,

Д. А. Никитин<sup>2</sup>, канд. техн. наук, А. Г. Сазонтов<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, В. А. Сергеев<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

## MATCHED FIELD ACOUSTIC SIGNAL PROCESSING IN UNDERWATER SOUND CHANNELS: STATE-OF-THE-ART, ESTIMATES OF THE OUTPUT PERFORMANCES, AND THE PROSPECTS

A. I. Malekhanov<sup>1</sup>, Ph.D., V. V. Kovalenko<sup>1,2</sup>, Ph.D., D. A. Nikitin<sup>2</sup>, Ph.D., A. G. Sazontov<sup>1</sup>, Dr.Sc.,

V. A. Sergeev<sup>2</sup>, Ph.D.

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

*Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в исследовании различных методов обработки акустических сигналов в подводных каналах, остаются вопросы, которые все еще требуют своего углубленного рассмотрения. Более того, даже на уровне используемой терминологии сохраняется ряд спорных представлений, указывающих на определенную неоднозначность трактовки «согласованной со средой» обработки сигналов применительно к низкочастотной подводной акустике. Цель доклада — осветить современное состояние тематики с акцентом на принципиальных физических аспектах, в наибольшей степени влияющих на результативность методов обработки, построенных на основе модели среды, и условиях практической применимости таких методов в реальных морских условиях. Даны примеры расчета характеристик эффективности согласованной со средой обработки для некоторых типичных условий приема сигналов в подводных каналах с помощью вертикальных антенных решеток, сформулированы перспективные направления дальнейших исследований.*

*Despite the significant progress made in the study of various acoustic signal processing techniques in underwater channels, there are still issues that require in-depth consideration. Moreover, even at the level of the terminology used, a number of controversial ideas remain, indicating a certain ambiguity in the interpretation of "matched-field" signal processing as applied to low-frequency underwater sound. The main goal of our talk is to highlight the current state of the subject with an emphasis on the fundamental physical aspects that most affect the array processor schemes based on the environmental model, and the conditions of practical applicability of such schemes in real sea conditions. Examples of model-based calculations of the output array performances are given taking into account some typical conditions of signal reception in underwater channels by the use of vertical arrays, and promising research lines are formulated.*

**Введение.** Несмотря на полувековую историю, сотни публикаций и, казалось бы, всестороннее рассмотрение проблемы усилиями многих авторов (например, обзоры [1, 2]), указанная в названии доклада тематика исследований сохраняет свою актуальность. Это связано не только с ожиданиями определенных прорывов в данном направлении с точки зрения решения прикладных задач низкочастотной подводной акустики, но и с тем, что сам предмет — «согласованная со средой обработка сигналов» — трактуется в сообществе специалистов широко и даже неоднозначно, с акцентом на природной специфике океана как среды распространения звуковых сигналов. Вместе с тем, если следовать общей теории и технике обработки сигналов, проблема согласования со средой (как задача) является совершенно общей — *любая* обработка, претендующая на что-либо существенное в смысле эффективности (по энергетическим или вероятностным характеристикам), с необходимостью должна учитывать адекватную модель среды. По существу, это и означает согласование обработки со средой распространения принимаемых сигналов. Но если говорить об акустике *реального* океана, то проблема согласования (уже не как задача, но основная трудность) заключается именно в том, что подобное согласование практически недостижимо. Причем, и это принципиально важно, оно недостижимо не по техническим причинам, но прежде всего потому, что физических параметров океанической среды, прямо или косвенно влияющих на распространения звука, весьма много и они заведомо не известны точно. Более того; подводный канал является нестационарным,

следовательно, некоторые из его параметров, даже если они хорошо известны «здесь и сейчас», являются изменчивыми, причем на разных временных масштабах. Наконец, канал является, как правило, горизонтально-неоднородным на протяженных трассах распространения сигналов, которые оцениваются как рабочие для диапазона низких частот.

Таким образом, можно констатировать, что согласованная со средой обработка сигналов в приложении к низкочастотной подводной акустике — больше лозунг, ориентированный на достижение некоторой идеализированной ситуации, чем практическая методология.

Если исходить из такой оценки, то предметом актуальных исследований и разработок является, скорее, «рассогласованная» обработка, причем неизбежно с разной степенью рассогласования (*априорной неопределенности*) — по различным параметрам, с разными дисперсиями отклонений от реальных значений и разными временами стационарности. Следовательно, основные задачи исследований концентрируются в следующих направлениях:

1) получение *реалистичных* оценок влияния априорной неопределенности морской среды распространения акустических сигналов удаленных источников на выходные характеристики методов их обработки в каналах приемной антенной решетки (АР);

2) анализ возможностей преодоления (заведомо, частичного) этой неопределенности как с помощью средств *оперативной* океанографии (путем уточнения совокупности требуемых параметров с учетом их пространственной и временной изменчивости), так и с помощью самих методов обработки путем реализации *адаптивного* подхода к их построению — подхода, который принципиально не использует заданную модель среды с фиксированными значениями параметров, но априори допускает рассогласование модели с реальным каналом.

Итак, цель нашего доклада: кратко осветить круг поднятых вопросов с акцентом на отмеченных двух принципиальных аспектах данной тематики. Мы обсудим несколько модельных примеров, иллюстрирующих эти аспекты, применительно к обработке сигналов в АР вертикального размещения.

**Влияние априорной неопределенности модели канала.** В рамках данной постановки мы рассматриваем канал мелкого моря с профилем скорости звука, типичным для северных морей в летний период. Предполагаем, что сигнал локализованного подводного источника принимается вертикальной АР на фоне интенсивной помехи, создаваемой подповерхностным источником (например, надводным судном). Эффективность АР как пространственного фильтра сигналов с тем или иным методом обработки стандартно характеризуется коэффициентом усиления (антенным выигрышем) по величине отношения сигнал/(шум + помеха) (ОСШП). Предполагаем также, что основные свойства канала — вертикальный профиль скорости звука, скорость звука в донных породах и их плотность — известны с *произвольными* отклонениями от заданных значений в пределах заданных интервалов, которые в совокупности характеризуют априорную неопределенность модели среды. Основной наш интерес в такой постановке связан с анализом влияния неопределенности (рассогласования) модели на величину антенного выигрыша для двух «классических» методов обработки — согласованной с сигналом обработки и оптимальной (по критерию максимума ОСШП) обработки [3].

Расчеты выполнены в рамках модового описания звуковых полей в подводном канале с использованием данных одного из натуральных экспериментов ИПФ РАН в Баренцевом море. На рис. 1 (слева) показаны профиль скорости звука (построен по 32-м точкам измерений, отмеченных звездочками) и положение АР в канале (13 гидрофонов, расположенных эквидистантно через 8,5 м в наиболее «озвученной» области канала в интервале глубин от 44,5 до 146,5 м — отмечены кружками). Параметры дна (моделируется жидким полупространством): плотность  $\rho_b = 1,8 \text{ г/см}^3$ , скорость звука  $c_b = 1750 \text{ м/с}$ , декремент затухания звука  $0,07 \text{ дБ/км}\cdot\text{Гц}$ . Полное число мод дискретного спектра при заданных параметрах канала на заданной частоте 240 Гц составляет 28, т.е. канал распространения является *многомодовым*. Источник полезного сигнала предполагается на глубине 80 м, источник помехи — на глубине 10 м, расстояния до источников выборочно меняются в интервале от 10 до 30 км. В соответствии с выбором глубин источников, модовый состав принимаемых сигналов (рис. 1, справа) оказывается сильно неравномерным и, что еще более важно, существенно различным (при расчетах полей на входе АР учитывается неравномерное модовое затухание по дистанции, наиболее характерное для мод высоких номеров). Отношение суммарных (по элементам АР) интенсивностей сигнала и помехи

выбрано на уровне  $-10$  или  $-20$  дБ, т.е. моделируется сценарий приема слабого многомодового сигнала, «маскируемого» интенсивной модовой помехой.

Влияние рассогласования расчетной модели с реальным каналом демонстрируется методом стохастического моделирования. Для этого мы предполагаем априори неизвестные отклонения параметров от указанных выше «точных» (заданных априори) значений в некоторых заданных пределах: 3 м/с для скорости звука в водном слое (в каждой точке), 15 % для скорости звука в дне, 50 % для плотности дна. Подчеркнем, что предполагаемый нами разброс значений скорости звука составляет малую величину в сравнении с той вертикальной изменчивостью профиля ( $\sim 20$  м/с), которая приводит к формированию данного канала придонного типа. Отклонения параметров дна задаются в намного больших пределах, поскольку эти параметры известны на практике, как правило, наименее точно.

Не останавливаясь на деталях [3], отметим, что расчет весовых векторов АР использует выражения, хорошо известные для случая приема полностью коррелированного (на размерах АР) полезного сигнала на фоне произвольным образом коррелированных помех и шумов. Нами рассматривается именно такой сценарий, указанные дистанции для диапазона первых сотен Гц ему соответствуют. Метод согласованной с сигналом обработки (в точном значении этого термина) физически отвечает операции обращения волнового фронта сигнала, частично «перехваченного» в волноводе вертикальной АР. Его эффективность при малых значениях входного ОСШП определяется не только размером АР, но и тем, насколько моды сигнального поля «накрыты» помехой (см. рис. 1). Оптимальная обработка обеспечивает дополнительное увеличение выходного ОСШП в результате подавления наиболее интенсивных мод помехового поля, несмотря на частичное подавление при этом сигнальных мод, и потому чем выше интенсивность помехи, тем выше значение достигаемого при этом антенного выигрыша.

Величины входного и выходного ОСШП ( $SNR_{in}$  и  $SNR_{out}$ , соответственно) рассчитываются по стандартным формулам на основе расчета реплик принимаемых сигналов, далее рассчитывается величина коэффициента усиления  $G$  (выигрыша), нормированного на число  $N$  элементов АР:  $G = SNR_{out} / SNR_{in}$ ,  $g = G / N$ . Такая величина наиболее удобна в качестве характеристики, явно демонстрирующей отличие эффективности АР как пространственного (модового) фильтра от той ситуации, когда весовой вектор АР точно согласован с полностью когерентным полезным сигналом, принимаемым на фоне пространственно-белого шума, т.е. когда выполняется:  $G = N$ ,  $g = 1$ . Нормированный выигрыш неоднократно использовался в целях моделирования влияния реалистичных эффектов распространения акустических сигналов в подводных каналах на эффективность их пространственной обработки (например, [4–7]).

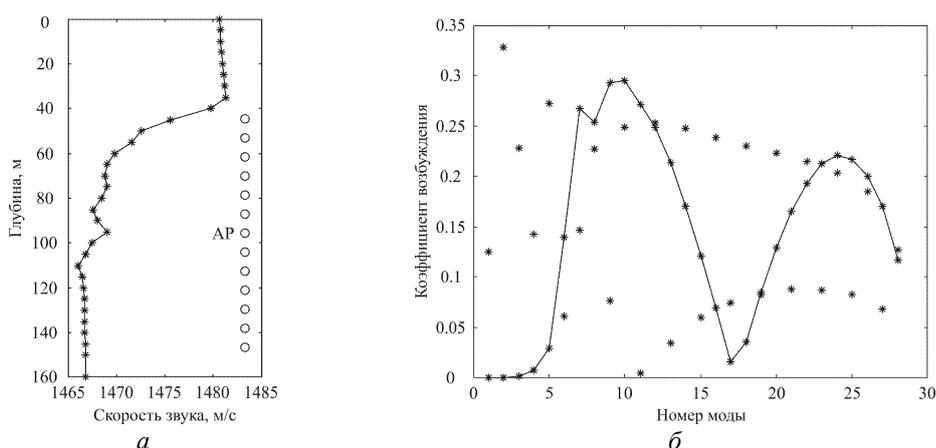


Рис. 1. Опорный профиль скорости звука в канале Баренцева моря и положение АР (а); нормированные коэффициенты возбуждения мод в поле полезного сигнала (звездочки) и помехи (сплошная кривая) на входе АР при удалении обоих источников на 15 км (б).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Таким образом, статистический ансамбль реплик принимаемых полей на входе АР, отвечающий ансамблю реализаций модели канала с учетом «расстройки» по указанным параметрам, формирует ансамбль величин антенного выигрыша. Последующее их усреднение дает ту величину, которую естественно назвать «реальными» значениями выигрыша в условиях априорной неопределенности. Их зависимость от амплитуды вариаций параметров позволяет количественно оценить пределы *допустимых* отклонений (по заданному уровню потерь усиления) параметров модели от тех значений, которые определяют опорную модель среды и с учетом которых «настраивается» АР (рассчитываются весовые векторы).

На рис. 2 выборочно иллюстрируется влияние априорной неопределенности модели канала по профилю скорости звука в водном слое (рис. 2, а), скорости звука в дне (рис. 2, б) и плотности дна (рис. 2, в). Видно, что согласованная обработка в условиях интенсивной помехи заметно (в разы) проигрывает оптимальной обработке, и этот проигрыш ожидаемо растет с ростом интенсивности помехи к сигналу и(или) таким изменением модового состава сигнала и помехи (например, при изменении глубины одного или обоих источников), при котором их частичное «перекрытие» усиливается. Видно также, что согласованная обработка является более устойчивой к рассогласованию и, более того, может демонстрировать немонотонную зависимость от амплитуды изменчивости параметров канала. Такая особенность также объясняется присутствием мощной помехи — «разумное» рассогласование весового вектора АР с репликами принимаемых сигналов приводит к повышению выходного ОСШП и усиления АР в случае, если при этом достигается дополнительное подавление помехи, превосходящее подавление полезного сигнала. Видно, что при амплитуде отклонений профиля скорости звука  $\sim 1$  м/с или скорости звука в дне  $\sim 1\%$  ( $\sim 20$  м/с) оба метода обработки показывают уже практически одинаковую эффективность, при этом относительные потери усиления оптимальной обработки значительно превосходят потери усиления согласованной обработки.

При совместном рассогласовании модели по всем обсуждаемым параметрам, его влияние ожидаемо становится еще более значительным. Достижение потенциально высоких величин выигрыша, кратно превосходящих число элементов АР (как на рис. 2), становится невозможным даже при самых малых вариациях профиля скорости звука в случае, если «сопутствующие» вариации донных параметров составляют хотя бы единицы процентов [3].

Таким образом, уровни допустимых отклонений параметров канала для различных методов обработки многомодовых сигналов оказываются не просто разными, но и сильно зависящими от того, по какому именно параметру модель канала отлична от реальной среды. Это означает, что универсальные оценки приемлемого качества согласования многопараметрической модели (в процентном отношении или в размерных единицах) отсутствуют в принципе. Кроме того, целый ряд независимых факторов влияет на величины потерь выигрыша АР: интенсивности и глубины источников, положение АР в канале, выбор метода пространственной обработки.

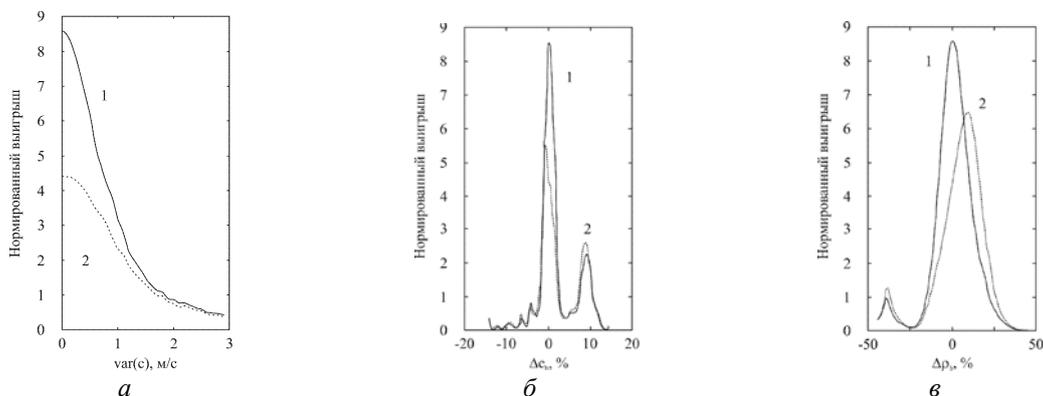


Рис. 2. Нормированный антенный выигрыш  $g$  для оптимальной обработки (сплошные кривые 1) и согласованной обработки (точечные кривые 2) в зависимости от амплитуды вариаций профиля скорости звука в водном слое (а), скорости звука в дне (б) и плотности дна (в).

Расстояния до источников равны 15 км, отношение интенсивностей полезного и помехового сигналов к интенсивности белого шума на входе АР — 1:10:100 [3].

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**Возможности адаптивных алгоритмов.** Наравне с теми вопросами, которые касаются количественной оценки требований к точности оперативного контроля состояния подводного канала для достижения высокой эффективности приемных АР в реальных морских условиях, принципиальный интерес представляют вопросы синтеза и анализа таких алгоритмов обработки сигналов, которые позволяют преодолеть, хотя бы частично, априорную неопределенность модели среды. Как уже отмечено выше, такие алгоритмы относятся, по определению, к классу адаптивных алгоритмов, теория и техника которых достаточно хорошо развита для условий работы АР в свободном пространстве. Одним из перспективных подходов к разработке алгоритмов, обладающих повышенной устойчивостью к рассогласованию (робастных алгоритмов), является тот, который основан на эвристическом сценарии «наихудшего приема» (*worst-case scenario*) [8]. Смысл его заключается в том, что при построении процессора АР априори предполагается, что необходимые для этого вторые моменты реплик принимаемых сигналов известны не точно, но с некоторой ошибкой, мера которой трактуется как оценка сверху для величины рассогласования.

Один из интересных примеров реализации такого подхода представлен в недавней работе [9]. Здесь предполагается не только возможность отличия детерминированных его параметров (параметров дна) от реальных, но учитываются также *статистические* эффекты, обусловленные многократным рассеянием звука на взволнованной морской поверхности. На рис. 3 показан результат апробации предложенного алгоритма с использованием данных того же эксперимента в акватории Баренцева моря, для условий которого выполнено моделирование в рамках предыдущей задачи. Учет вклада рассеянной компоненты в принимаемый сигнал выполнен на основе развитого ранее метода решения уравнения переноса в случайно-неоднородном волноводе, но при этом учитывается также рассогласование входной корреляционной матрицы в терминах сценария «наихудшего приема». Источник реально располагался на удалении 13,8 км от АР (см. рис. 1) вблизи дна на глубине 148 м.

Видно, что все три алгоритма справляются с задачей локализации источника — оценка дальности и глубины достаточно хорошо соответствует реальным его координатам. Вместе с тем, уровень боковых лепестков функции неопределенности (ФН), которая определена здесь как выходная мощность процессора АР, критически зависит от того, учитывается ли рассеяние сигнала на ветровом волнении (центральный график) и затем — рассогласование модельной матрицы когерентности рассеянной компоненты с реальной (правый график). Можно ожидать, что с ростом расстояния рост качества локализации источника с помощью предложенного алгоритма будет только возрастать. Этот качественный вывод ограничен, однако, теми расстояниями, на которых флуктуации сигнала еще не приводят к подавлению когерентной компоненты сигнала, которая содержит информацию относительно параметров источника.

Отметим, что аналогичный подход к построению робастной адаптивной обработки многомодовых сигналов может быть использован для частичной компенсации эффектов рассогласования модели канала по тем ее параметрам, которые в натуральных условиях могут не испытывать флуктуаций (те же параметры дна или положения самой АР) [10, 11].

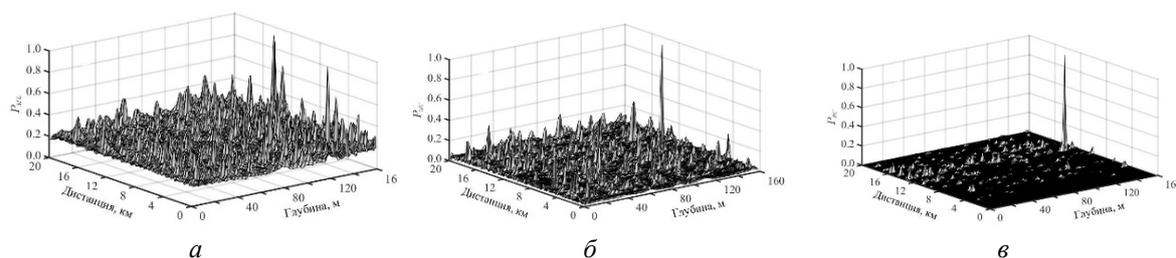


Рис. 3. Функция неопределенности оценки координат источника на выходе процессора, использующего алгоритм максимального правдоподобия без учета рассеяния звука на ветровом волнении (а), обобщенный алгоритм Кейпона (б) и робастный алгоритм (в) [9].

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

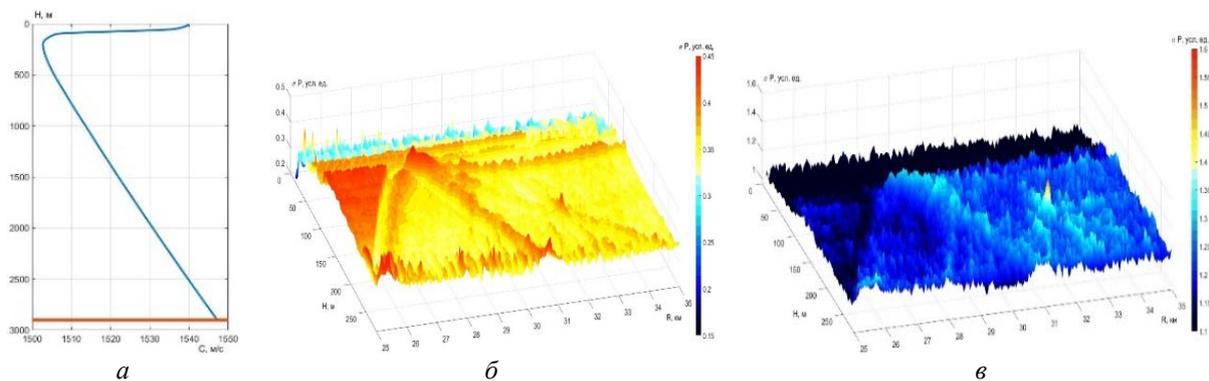


Рис. 4. Модельный профиль скорости звука в глубоководном канале (а); функция неопределенности оценки координат источника на основе точного согласования расчетной модели со средой (б) и дополнительной пространственной обработки (в).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**Согласование со средой на основе лучевых схем расчета полей.** Рассмотренные выше примеры относились к волновым методам расчета акустических сигналов в подводных каналах на основе модового формализма, условия применимости которого хорошо известны. Для диапазона низких частот (первые сотни Гц) такой подход является наиболее эффективным, особенно в условиях мелкого моря, где полное число мод дискретного спектра относительно невелико, а достаточно быстрое (по дистанции) затухание мод высоких номеров приводит к еще большему сокращению числа энергонесущих мод звукового поля отдельного источника. Все сказанное не исключает целесообразности других схем расчета акустических полей на входе АР, если они оказываются эффективнее (проще в численной реализации или в большей степени отвечающими физическим параметрам задачи). Для диапазона более высоких частот (единицы кГц) более эффективными и наглядными оказываются *лучевые* схемы расчета.

Один из таких примеров касается модельного расчета эффективности согласованной со средой обработки в условиях глубокого океана, когда формируется подводный звуковой канал с заглубленной осью. Предполагается, что вертикальная эквидистантная АР содержит 31 элемент с межэлементным расстоянием 1 м (полоса частот 500–1000 Гц), при этом АР расположена в районе оси канала (глубина погружения нижнего гидрофона — 500 м). Диапазон глубин расположения источника звука меняется в пределах 6...280 м; диапазон расстояний от АР до источника — 25...35 км. Расчет сигналов на элементах АР выполняется с учетом того количества лучевых траекторий, которые соединяют источник с каждым из них, изменчивости амплитуды, фазы и времени распространения сигнала по каждой лучевой траектории. Для локализации источника пространство волновода разбивается на ячейки разрешения (с дискретностью по расстоянию — 50 м, по глубине — 4 м), затем для каждой ячейки определяются уровни сигналов на каждом элементе и контролируется их изменчивость. Ячейка, для которой отклонение от фонового значения является максимальной, определяется в качестве «сигнальной» и дает оценку области локализации источника звука.

На рис. 4, а–в представлены: модельный профиль скорости звука в канале; результаты расчета ФН по координатам источника при использовании точно согласованной со средой обработки (для заданных координат источника (32 км; 200 м) и с использованием дополнительной пространственной обработки, понижающей уровень боковых лепестков ФН. Видно, что рельеф ФН в первом случае содержит большое количество боковых максимумов, сопоставимых с главным максимумом, отвечающим положению источника, в то время как дополнительная обработка позволяет добиться лучшей его локализации.

**Заключение.** В качестве заключения нам представляется важным сформулировать, что же нужно делать для того, чтобы «согласованная со средой обработка» имела более определенные шансы на успех в реальных условиях, и как количественно его оценивать.

Опираясь на большое количество предыдущих работ и те демонстрационные примеры, которые представлены выше, можно заключить, что фактической мерой согласования обработки со средой является величина потерь относительно той идеализированной обработки, которая все

и при этом точно «знает» про среду, т.е. величина «потерь рассогласования» (в дБ для ОСШП и выигрыша АР, в относительных величинах для точности локализации или вероятностной оценки других параметров источника). Методы обработки могут быть при этом самыми разными и в разной степени учитывающими реальную специфику приема сигналов в натуральных условиях, поэтому их устойчивость к рассогласованию также оказывается заметно различной. Привлечение средств оперативной оценки параметров среды необходимо, и требования к ним определяются той же величиной потерь, но не произвольно. Очевидно, что лучше неточная модель среды, чем никакая (совсем грубая), но также ясно, что вопрос о приемлемом уровне «неточности» является одним из ключевых в обсуждаемом контексте.

Что же касается перспектив развития самих методов обработки, то здесь наибольший интерес, по нашему мнению, представляют адаптивные алгоритмы повышенной устойчивости к рассогласованию (детерминированному и статистическому). Такие алгоритмы априори предполагают определенный уровень неточности знания среды и в этих условиях достигают результата — не абсолютно лучшего, но лучшего из *реально возможных*. Подчеркнем еще раз, что до настоящего времени вся концепция «согласования со средой» демонстрировалась преимущественно в рамках заданных моделей подводных звуковых каналов, именно этим во многом обусловлены принципиальные ограничения ее практического применения в гидроакустике и даже определенный скепсис в отношении дальнейших перспектив [12].

### *Литература*

1. Малышкин Г. С., Сидельников Г. Б. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов (обзор) // Акуст. журн. 2014. Т. 60, № 5. С. 526–545.
2. Сазонтов А. Г., Малеханов А. И. Сogласованная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // Акуст. журн. 2015. Т. 61, № 2. С. 233–253.
3. Малеханов А. И., Смирнов И. П. Пространственная обработка акустических сигналов в каналах мелкого моря в условиях априорной неопределенности: оценки потерь эффективности // Акуст. журн. 2022. Т. 68, № 4. С. 427–439.
4. Городецкая Е. Ю., Малеханов А. И., Таланов В. И. Моделирование оптимальной пространственной обработки сигналов в подводных звуковых каналах // Акуст. журн. 1992. Т. 38, № 6. С. 1044–1051.
5. Городецкая Е. Ю., Малеханов А. И., Сазонтов А. Г., Фарфель В. А. Влияние эффектов дальнего распространения звука в случайно-неоднородном океане на потери усиления горизонтальной антенной решетки // Акуст. журн. 1996. Т. 42, № 5. С. 615–621.
6. Вдовичева Н. К., Городецкая Е. Ю., Малеханов А. И., Сазонтов А. Г. Коэффициент усиления вертикальной антенны в случайно-неоднородном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1997. Т. 43, № 6. С. 769–776.
7. Завольский Н. А., Малеханов А. И., Раевский М. А. Сравнительный анализ методов пространственной обработки сигналов, принимаемых горизонтальной антенной решеткой в канале мелкого моря со взволнованной поверхностью // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 5. С. 608–618.
8. Robust Adaptive Beamforming / Ed. J. Li, P. Stoica. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2006.
9. Сазонтов А. Г., Смирнов И. П. Локализация источника в случайно-неоднородном канале с использованием многогрангового алгоритма Кейпона // Акуст. журн. 2021. Т. 67. С. 659–667.
10. Сазонтов А. Г., Смирнов И. П. Определение направления на источник в акустическом волноводе и предел углового разрешения // Акуст. журн. 2021. Т. 67, № 2. С. 174–184.
11. Сазонтов А. Г., Смирнов И. П. Локализация источника в акустическом волноводе с неточно известными параметрами с использованием согласованной обработки в модовом пространстве // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 4. С. 540–550.
12. Baggeroer A. B. Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP? // Proc. 1st Int. Conf. and Exhib. on Underwater Acoustics / Ed. J. S. Papadakis, L. Bjørnø. Corfu Island, Greece. 2013. P. 41–49.

Авторы данной работы из ИПФ РАН (А. И. Малеханов и А. Г. Сазонтов) благодарят РФФИ за поддержку данного исследования по гранту № 20-19-00383.

## БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И КИТООБРАЗНЫХ

*М. П. Иванов*, канд. биол. наук, *Н. А. Данилов*<sup>1</sup>, канд. техн. наук, *М. И. Калинов*<sup>2</sup>, д-р техн. наук, *А. А. Родионов*<sup>3, 4</sup>, чл.-корр. РАН, *В. Е. Стефанов*, канд. биол. наук

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургское отделение Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, Россия

<sup>3</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

## BIOTECHNICAL SYSTEMS BASED ON THE USE OF TECHNICAL FACILITIES AND CETACEANS

*M. P. Ivanov*, Ph.D., *N. A. Danilov*<sup>1</sup>, Ph.D., *M. I. Kalinov*<sup>2</sup>, Dr.Sc., *A. A. Rodionov*<sup>3, 4</sup>, corresponding member of RAS, *V. E. Stefanov*, Ph.D.

Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg branch of the Section of Applied Problems at the Presidium of RAS, Russia

<sup>3</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>St. Petersburg Research Center of RAS, St. Petersburg, Russia

*Рассматриваются новые решения некоторых технических проблем привлечения животных к выполнению задач двойного назначения. В первую очередь, это задачи служебного использования животных на основе новых технологий управления двигательным поведением с помощью акустической связи, реализующей применение естественных акустических сигналов коммуникации дельфинов. Создание новой технологической базы, а также модернизированного методического обеспечения является основой развития технологий лингвистического анализа акустических последовательностей и использования новых знаний при построении биотехнических комплексов.*

*New solutions to some technical problems of attracting animals to perform dual-purpose tasks are considered. First of all, these are the tasks of the official use of animals based on new technologies for controlling motor behavior using acoustic communication, which implements the use of natural acoustic signals of dolphin communication. The creation of a new technological base, as well as modernized methodological support, is the basis for the development of technologies for the linguistic analysis of acoustic sequences and the use of new knowledge in the construction of biotechnical complexes.*

Использование одомашненных животных для нужд человечества происходило во все времена [1]. Первоначально это было связано с сельским хозяйством (лошадь, корова, коза, собака, птицы и т.д.), а затем — с военными задачами (тигры, львы, слоны и т.д.). Обезьяны свыкаются с человеческим обществом и помогают человеку добывать плоды, находящиеся на высоких пальмах. С помощью обезьян и собак успешно реализуется программа помощи слепым и слепоглухим. Развитие направления одомашнивания морских животных привело к появлению новых задач исследования дельфинов: гидробионических задач, задач исследования помехозащищенности природного сонара для создания их технического аналога [2]. Особо следует выделить задачи военного характера: охрана особо важных объектов в сложных условиях антропогенных и естественных помех; поиск утраченных подводных объектов; поиск и обезвреживание подводных диверсантов [3].

Как показала практика, одомашнивание дельфина и обучение основным командам требует до 6–8 месяцев непрерывного взаимодействия между дельфином и дрессировщиком. Однако накопившийся материал по взаимодействию с дельфинами показал ограниченность существующих каналов передачи информации между дельфином и дрессировщиком. Зрительный канал работает только при хорошей освещенности, а тактильный — только при непосредственном контакте. И тот и другой каналы являются каналами ближнего действия (на расстоянии не более 15 м), что значительно сужает возможности использования дельфинов в биотехнических системах. Использование животных в открытой воде для решения прикладных задач, в том числе для поиска утраченных объектов связано, прежде всего, с решением поисково-спасательных и экологических задач [4]. При этом проявляется ограниченность имеющихся

возможностей передачи информации, что особенно важно при поиске только что утраченных объектов или объектов, не встречавшихся во время обучения. Поэтому абстрагирование видео и акустического образа от конкретных объектов является одной из важнейших современных задач обучения и использования животных для работы в открытой акватории. Необходимо добиться такого взаимодействия между дельфином и дрессировщиком, при котором подаваемые команды однозначно соответствовали бы пространственной ориентации (нырнуть глубже, повернуть направо, повернуть налево, вверх или вниз), «пониманию» дельфином не только существительных, но и глаголов, а также местоимений и числительных. Таким образом, решение тех же самых задач, но на новом уровне контакта между дельфином и дрессировщиком, значительно расширит возможности дрессировки служебных животных за счет полученных знаний при исследовании когнитивных функций дельфинов — памяти, словарного запаса, скорости обучения, счета, возможности вербального взаимодействия, управления акустическим поведением, дальности и помехозащищенности канала вербального взаимодействия [5].

В настоящее время дельфин рассматривается как робот для подводных работ, но в перспективе необходимо иметь интеллектуального робота для поисково-спасательных операций на море, сбора данных, высокоточного картирования дна и доставки минералов на поверхность воды. Решения таких задач требует проведения планомерных исследований по изучению когнитивных функций дельфинов с использованием технологий многоканальной сверхширокополосной системы регистрации сигналов морских млекопитающих с обработкой биоакустической информации в реальном масштабе времени. Многоканальность позволяет точно идентифицировать сигналы с конкретным животным, выполняющим поставленную дрессировщиком задачу. Сверхширокополосность тракта регистрации дает возможность точно описать принимаемые сигналы как в частотной, так и во временной областях. Для точного понимания исследуемых сигналов морских млекопитающих необходимо иметь возможность воспроизведения эксперимента, в котором провокация двигательного или акустического поведения дельфина точно рассчитывается на основе известных методических приемов лабораторного опыта. Такие эксперименты важны при решении дельфином задач обнаружения подводных объектов на различных дистанциях и в условиях искусственного воздействия с помощью антропогенных помех.

Последние исследования в этой области показали, что некоторые зарегистрированные биосигналы являлись результатом искажения их в приемном тракте. Особенно это касается сигналов, записанных в полосе частот до 20 или 50 кГц. На рис. 1 представлена полная последовательность сигналов дельфина в одном испытании при решении задачи поиска подводных объектов в статическом режиме эхолокации в сложных условиях преднамеренных низкочастотных помех. Дальность объекта поиска составляла 200 м при глубине погружения мишени 2 м и преднамеренной широкополосной помехе до 100 кГц на расстоянии 220 м от животного. Как видно из осциллограммы (рис. 1, а), дельфин использует пакеты ультракоротких импульсов (УКИ) с время-импульсной модуляцией (ВИМ). На динамическом спектре (рис. 1, б) хорошо выделяются спектры УКИ, которые не превышают величину 200 кГц, что обусловлено шириной полосы частот тракта регистрации. При рассмотрении динамического спектра в низкочастотной области (рис. 1, в) на частотах от 1 кГц до 18 кГц сигналы не выделяются, т.е. в зарегистрированных пакетах существуют только сверхширокополосные УКИ [6].

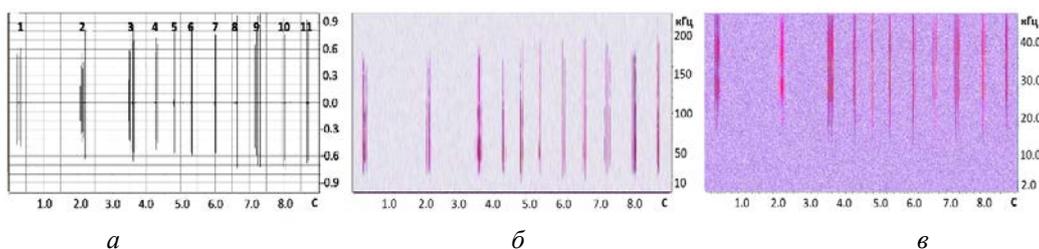


Рис.1. Последовательность пакетов УКИ при решении задачи обнаружения в условиях низкочастотный преднамеренной помехи.

а — осциллограмма; б — динамический спектр в полосе частот до 200 кГц;

в — динамический спектр в полосе частот до 45 кГц.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Исследование сонара дельфина в условиях динамики, когда дельфин движется на максимальной скорости, требует надежной фиксации видео и акустического оборудования на теле животного. В данном случае необходимо иметь не только сверхширокополосную аппаратуру, но и максимально ее миниатюризировать с необходимым креплением на коже или специальном бандаже на животном. Сложность реализации этой задачи приводит к получению результатов акустических измерений с большими искажениями.

В современных исследованиях показано, что дельфины активно используют как режим моноимпульсной эхолокации, так и режим мультиимпульсной эхолокации с ультракороткими биполярными импульсами с относительной широкополосностью до 0,7. В режиме моноимпульсной эхолокации интервал между импульсами в отличие от идеального наблюдателя (наблюдатель работает без задержки) задержка изменяется в зависимости от помеховых условий проведения эксперимента. При этом коэффициент перекрытия составляет величину  $\sim 1.1 \div 1.3$ . При работе в сложных акустических условиях дельфин излучает пакеты ультракоротких импульсов с использованием время-импульсной модуляции интервала между импульсами в пакетах. Количество импульсов в пакетах зависит от акустической обстановки и наличия цели, а коэффициент перекрытия может увеличиваться до  $\sim 1.5 \div 1.7$ . При отсутствии цели в секторе обзора, коэффициента перекрытия увеличивается до  $\sim 2 \div 3$ , а в особо сложных условиях и до  $\sim 4$  [7].

В процессе создания системы вербального взаимодействия необходимо иметь соответствующее оборудование для подводного воспроизведения видеорядов и аппаратуры акустического взаимодействия между животными либо между дельфином и дрессировщиком. Основная направленность исследований при этом состоит в провокации вербального взаимодействия с помощью синтеза и трансляции коммуникационных сигналов во время эксперимента, а также в сопоставлении сценария эксперимента и полученного акустического ряда, излучаемого экспериментальным животным. База данных таких сигналов с сопоставлением сценария двигательного и акустического поведения позволит провести лингвистический анализ вербального поведения. Как показали первые эксперименты, дельфины в подобных условиях используют пакеты УКИ с ВИМ интервала между импульсами с переменной длительностью пакетов и количеством импульсов в пакетах. При этом возникает вопрос для стороннего наблюдателя: «Чем отличаются пакеты УКИ импульсов, используемых дельфином для эхолокации в сложных условиях акустических помех и пакеты УКИ при вербальном взаимодействии?». Последние измерения показали, что в пакетах, состоящих из УКИ с ВИМ и фиксируемых при вербальном взаимодействии, частотный спектр большинства импульсов достигает 600 кГц, что хорошо заметно при регистрации этих сигналов в 2–3 м от животного. Минимальный интервал между импульсами в пакетах составляет 2 мс а максимальный — 120 мс, причем коэффициент модуляции составляет величину  $K_{\text{мод}} = 0,93 \pm 0,03$  для одних пакетов и для других  $K_{\text{мод}} = 0,3 \pm 0,2$  ( $K_{\text{мод}} = (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) / (t_{\text{max}} + t_{\text{min}})$ ). Такой значительный разброс коэффициента модуляции повторяем, как повторяемы длительность некоторых пакетов и количество импульсов в пакетах. В пакетах вербального взаимодействия, как правило, присутствуют частотно-модулированные (ЧМ) импульсы со слабо выраженной модуляцией или с ярко выраженной модуляцией несущей и длительностью, соизмеримой с длительностью пакета. В некоторых пакетах УКИ с ВИМ встроены два ЧМ импульса. Один импульс со слабо выраженной ЧМ, а второй импульс с ЧМ от 5 кГц до 25 кГц и более.

Таким образом, информационная нагрузка для пакетов с УКИ эхолокационных сигналов состоит во временном способе кодировании собственной последовательности импульсов в пакетах в отличие от сигналов, излучаемых другими особями. Если полоса частот регистрирующего тракта значительно снижена или место регистрации сигналов значительно удалено от максимума диаграммы направленности, то спектрально-временная структура биполярных УКИ импульсов будет нарушена за счет изменения пространственной структуры поля излучения, что приведет к исчезновению высокочастотных составляющих в пакетах импульсов и, в конечном итоге, к деструкции пакета и превращению его в шумоподобный сигнал с длительностью, равной длительности излученного пакета. Информационная нагрузка для пакетов импульсов вербального характера содержится в ВИМ, которая инвариантна к угловым искажениям сигнала, но чувствительна к искажению спектра импульсов в зависимости от угла наблюдения (рис. 2).

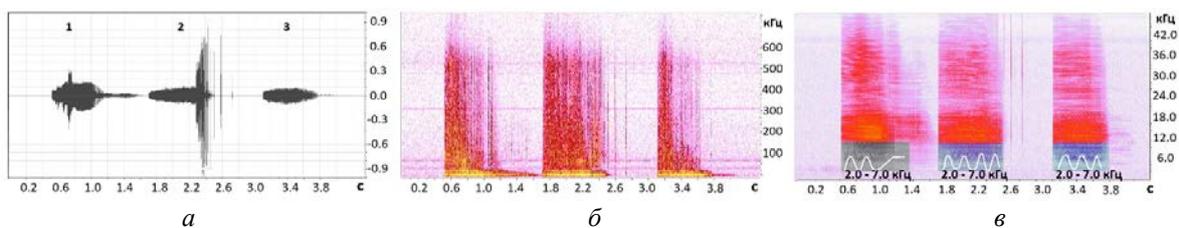


Рис. 2. Полная последовательность пакетов УКИ при вербальном взаимодействии с изображением на подводном мониторе.

*a* — осциллограмма; *b* — динамический спектр в полосе частот до 700 кГц; *c* — динамический спектр в полосе частот до 45 кГц с ярко выраженными ЧМ импульсами с псевдоимпульсной модуляцией несущей.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Для сохранения информационной части (по углу) в некотором виде необходимо, чтобы пространственная характеристика поля излучения сигналов коммуникации была шире, чем у сигналов эхолокации (это предположение нужно доказывать экспериментально). ЧМ сигнал, содержащийся в пакетах коммуникационных сигналов, также инвариантен к угловым искажениям спектра, т.к. на такой низкой частоте пространственные характеристики поля, как правило, гладкие и пологие и не содержат острых пиков, как на высоких частотах. Причем это относится и к ЧМ импульсам с малой модуляцией, так и к импульсам со значительной модуляцией несущей, т.е. возможно, что в сигналах дельфина природа использует двухуровневую частотную модуляцию (ДЧМ).

Традиционные активные гидроакустические системы в качестве несущего колебания при передаче информации используют гармонические или квазигармонические колебания. Расширить полосу частот в антенне излучения или приема мешают технологические ограничения построения широкополосных излучающих антенн [8], что приводит к комплексу проблем, свойственных традиционным узкополосным волновым сонарам: интерференции и многократным отражениям от препятствий, низкой проникающей способности сигнала, низкой помехоустойчивости и информационной незащищенности каналов передачи данных [9]. Хорошо известно, что риск столкновения мобильных подводных объектов связан с принципиальным противоречием противостояния в подводной среде — требованиями максимальной дальности обнаружения цели и минимальной дистанции скрытности. Степень заметности гидроакустических средств наблюдения определяется не только мощностью и характеристикой направленности излучающей антенны, но и пространственными частотно-временными параметрами сигналов. Именно эти факторы и определяют задачу проводимых исследований биологической акустической системы в условиях, приближенных к естественной сигнально-помеховой обстановке.

Системы со сверхширокополосными сигналами в большинстве прикладных задач обладают рядом преимуществ по сравнению с узкополосными что позволяет успешнее решать задачи обнаружения и распознавания подводных объектов, повышение информационного объема и скрытности передачи данных, а также повышение точности определения местоположения в навигации. Конечно, в настоящее время это только прогнозируемые параметры выигрыша, поскольку на практике необходимо иметь технический аналог подобной системы. Это возможно только после достижения соответствующего уровня технологии генерации мощных сверхкоротких импульсов с практически неограниченным ресурсом непрерывной работы, с высокой стабильностью и большой частотой повторения, технологии излучения таких импульсов в пространство (сверхширокополосная антенна), технологии скоростной обработки больших массивов информации (вычислительная техника и системы построения всей системы цифровой обработки данных).

Применение сверхширокополосных сигналов в системах передачи данных по гидроакустическому каналу позволит значительно повысить ее надежность и защищенность от несанкционированного проникновения, благодаря технологии расширения спектра [10]. Излучение ультракоротких биполярных импульсов выше полосы 1 МГц технологически уже реализовано в акустических томографах. Но необходимо получить такие же возможности и в

более низкочастотной части спектра, в той области частот, в которой работают китообразные: сигналы коммуникации — до 600 кГц, а сигналы эхолокации — до 100 кГц и менее. Особенно, это касается эхолокационных сигналов усатых китов, для которых регистрация и анализ сигналов эхолокации исследованы ограниченно. В технических системах предполагается создать антенну для излучения мощных ультракоротких биполярных широкополосных импульсов, т.к. такие сигналы не подвержены кавитации, даже при очень больших уровнях акустического давления. Технические системы по этому параметру в зависимости от частоты несущей ограничены пределами 220–230 дБ. Максимальный уровень акустического давления, который можно получить при излучении сигналов, подобных сигналам дельфина, гораздо выше и в настоящее время не определен.

Иными словами, основные отличия сонара китообразных от технических гидролокаторов состоят в том, что технические системы используют монохроматические импульсы для локации подводного пространства с разной частотой несущей, а биологический сонар использует сверхширокополосные УКИ биполярной структуры с неопределенным спектральным максимумом («сигнал без несущей») в различных частотных диапазонах и ВИМ, пакеты УКИ с ВИМ, длинные ЧМ сигналы, а также составные сигналы, такие как пакеты УКИ с ВИМ со встроенными ЧМ длинными импульсами, причем сигналы перекрываются по спектру друг с другом и могут излучаться одновременно. Синтезировать такие сигналы для создания преднамеренной помехи очень сложно, т.к. частотно-временные параметры зависят от угла наблюдения, и подобрать сигнал для подавления такой сверхширокополосной системы практически невозможно. Кодирование пакетов с ВИМ сигналов эхолокации дает возможность отстраиваться от сигналов других особей и выделять эхо-сигналы на фоне других сигналов по кодовой последовательности ВИМ.

Поле излучения сигналов эхолокации имеет нестационарную структуру, которая меняется от импульса к импульсу с помощью медленного сканирования пространства (поворот головы), быстрого сканирования (акустической линзой), изменением профиля луча (изменения геометрии акустической линзы). Поэтому посторонний наблюдатель не способен определить спектрально-временные параметры излученного импульса и создать соответствующую помеху. Помехозащищенность при этом обеспечивается разнообразием изменчивости сигналов, а скрытность обеспечивается нестационарной структурой поля излучения (изменением профиля пространственной характеристики поля излучения (рис. 3), минимальным временем излучения (биполярный импульс) и кодированием собственного излучения от сигналов других особей. В некоторых случаях при поиске цели, дельфин использует излучение с помощью формирования двух лучей одновременно (рис. 3).

Полученные результаты нашли свое подтверждение при проведении аналогичных работ на дельфине белухе (Владивосток, бухта Витязь) [11] и в экспериментах с применением методики акустической обратной связи в Сан-Диего [12]. В Сан-Диего работы по изучению адаптивных возможностей сонара китообразных продолжаются в целях исследования динамики излучения пакетов УКИ с ВИМ и формирования концепции обработки таких сигналов в слуховой системе дельфина.

В эксперименте в статическом режиме эхолокации использовалась система акустической обратной связи, что позволило получить значение энергетической дальности 850 м при использовании дельфином пакетов УКИ с ВИМ (рис. 1, а) [6]. Полученный результат обнаружения объекта на дальности 650 м [7] подтверждается установленным значением энергетической дальности.

Для демонстрации возможностей использования животных в задачах охраны поставлен специальный эксперимент, в котором дельфины работали в режиме запрос-ответ в условиях непрерывного наблюдения в течение 15 суток (рис. 4). [13, 14]. Эксперимент был остановлен самими экспериментаторами из-за собственной усталости решения задачи в непрерывном режиме длительное время.

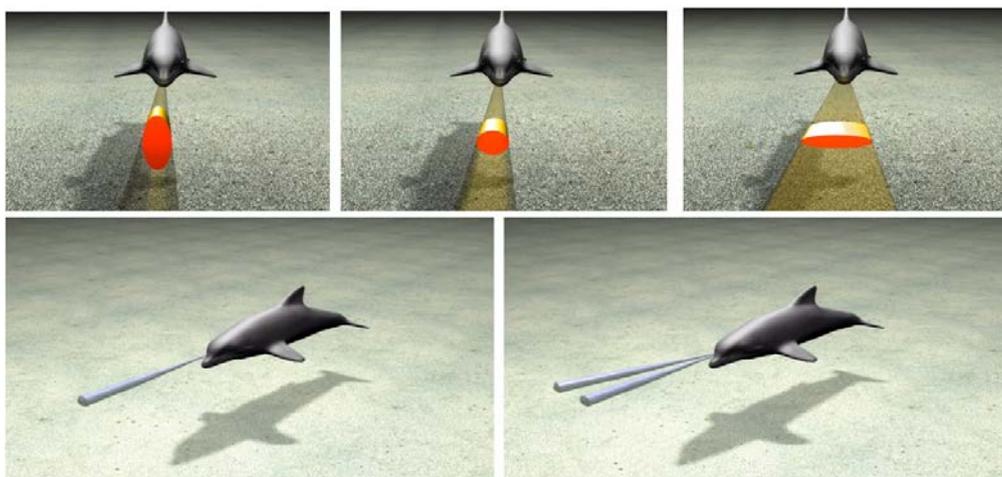


Рис. 3. Изменение профиля пространственной характеристики поля излучения и формирование одного либо двух лучей одновременно.

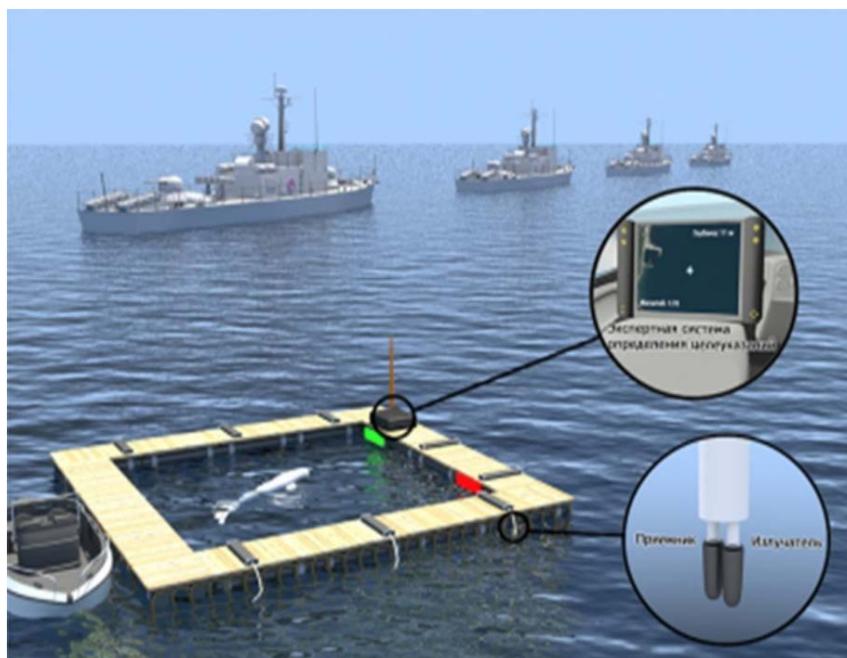


Рис. 4. Биотехнический комплекс охраны территорий в открытой акватории с системой целеуказания по сигналам эхолокации.

Таким образом, создание биотехнического комплекса с системой целеуказания и автоматизированной системой подготовки животного — это задача, которая может и должна быть оперативно решена в современных условиях. С помощью биотехнического комплекса появляется возможность не только тренировать дельфина и человека-оператора, но и обучать и совершенствовать интеллектуальную информационную систему корабельной охраны. Биотехнический комплекс должен снабжаться гидроакустической системой контакта с дельфином, обученного выполнению гидроакустических команд и подтверждений. Причем система акустических сигналов обмена информацией должна состоять из сигналов, имитирующих вербальное взаимодействие между дельфинами во время исследования когнитивных функций. Поэтому создание современной системы «биологический сонар — технический аналог» является необходимой задачей при разработке многоплановых роботизированных комплексов с активным применением технологий искусственного интеллекта.

*Литература*

1. Иванов А. А. Этология с основами зоопсихологии: Учебное пособие. СПб.: Изд. «Лань», 2007. 624 с.
2. Vincent M. J., Sayigh L. S. Communication in bottlenose dolphins: 50 years of signature whistle research // *J. of Comparative Physiology A*. 2013. Issue 6. Vol. 199. P. 479–489.
3. Стародубцев Ю. Д., Надолишня А. П. История, современное состояние и перспективы служебного использования китообразных в составе биотехнических систем двойного назначения // *Фунд. и прикл. гидрофиз.* 2011. Т. 4, № 3. С. 123–128.
4. Стародубцев Ю. Д., Надолишня А. П. Некоторые аспекты взаимодействия человека и дельфина // *Тр. Первой Междун. науч.-практ. конф. «Экологическое партнёрство. Аспекты взаимодействия человека и животного в современном обществе»*. СПб.: НОИР ООО «ИКЦ», 2010. С. 136–140.
5. Иванов М. П., Толмачев Ю. А., Тулуб А. А., Леонова Л. Е., Романовская Е. В. Изучение когнитивных функций дельфина (*Delphinapterus leucas*) // *Эволюционной биохимии и физиологии*. 2018. Т. 54, № 3. С. 217–219.
6. Stefanov V. E., Ivanov M. P., Kashinov V. V., Stepanov B. G. Mechanisms of interference resistance of the sonar system of dolphins exposed to man-made interference // *Symposium on Bio Sonar Systems and Bio-Acoustics, Institute Acoustics. Loughborough University*. 2009.
7. Иванов М. П. Эхолокационные сигналы дельфина (*Tursiops truncatus*) при обнаружении и распознавании подводных объектов. СПб: канд. диссертация. 2000.
8. Иванов М. П., Степанов Б. Г. Исследование акустического биосонара дельфина и возможности построения его технического аналога // *Фунд. и прикл. гидрофиз.* 2011. Т. 4, № 3. С.108–121.
9. Воронин В. А., Зайцев А. А., Пивнев П. П., Тарасов С. П. Широкополосные антенны гидроакустических систем подводного наблюдения и связи для оснащения необитаемых аппаратов // *Тр. XI Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб: Наука, 2012. С.108–111.
10. Архипкин В. Я., Мешковский К. А. Сравнительная помехозащищенность систем связи с широкополосными и узкополосными сигналами // *Информация и космос*. 2004. № 3. С. 22–27.
11. Рутенко А. Н., Вишняков А. А. Временные последовательности гидроакустических сигналов, генерируемых белухой при поиске и лоцировании подводных объектов // *Акуст. журн.* 2006. Т. 52, № 3. С. 375–384.
12. Finneran, J.J. Dolphin ‘packet’ use during long-range echolocation tasks // *J. Acoust. Soc. Am.* 2013. Vol. 133. P. 1796–1810. <https://doi.org/10.1121/1.4788997> Google Scholar Scitation.
13. Ridgway S., Keogh M., Carder D., Finneran J., Kamolnick T., Todd M., Goldblatt A. Dolphins maintain cognitive performance during 72 to 120 hours of continuous auditory vigilance // *J. of Experimental Biology*. Published by The Company of Biologists. 2009. Vol. 212. P 1519–1527. doi:10.1242/jeb.027896.
14. Branstetter B. K., Finneran J. J., Fletcher E. A., Weisman B. C., Ridgway S. H. Dolphins Can Maintain Vigilant Behavior through Echolocation for 15 Days without Interruption or Cognitive Impairment // *Published: October 17, 2012. DOI: 10.1371/journal.pone.0047478*.

## АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА И АКУСТООПТИКА В ГИДРОАКУСТИКЕ

*Л. В. Григорьев*, канд. физ.-мат. наук

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

## ACOUSTOELECTRONICS AND ACOUSTOOPTICS IN HYDROACOUSTICS

*L. V. Grigoryev*, Ph.D.

Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*В докладе рассмотрены варианты применения компонентов функциональной электроники (акустоэлектроники) и функциональной фотоники (акустооптики) в системах обработки гидроакустической информации.*

*The options for application of components of functional electronics (acoustoelectronics) and functional photonics (acoustooptics) in hydroacoustic data processing systems are considered in the report.*

Проведенный анализ схемотехники типовых трактов гидроакустических станций позволил выделить основные функциональные блоки и компоненты необходимые для построения гидроакустической системы, работающей в пассивном или активном режиме. В любой гидроакустической системе присутствуют блоки, модули или компоненты, выполняющие следующие функции:

- формирования сложных зондирующих сигналов;
- коррекции амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик адаптивных антенных систем гидроакустики;
- компенсации амплитудных и фазовых искажений сигналов, вызванных физическими свойствами среды распространения — среды с замиранием и рассеянием сигналов;
- обработки сигналов гидроакустических ФАР и систем с синтезируемой апертурой;
- проведения согласованной и оптимальной фильтрации гидроакустических сигналов;
- проведения спектральных, корреляционных и других интегральных преобразований сигналов в реальном масштабе времени.

Необходимо подчеркнуть, что в любых гидроакустических системах: в гидроакустических станциях, в системах гидроакустической связи или системах гидроакустического телеуправления/телеметрии весьма перспективно применение сложных сигналов с широкой базой (произведение длительности которых на ширину спектра превышает единицу). К таким сигналам можно отнести шумоподобные сигналы и сигналы с различной внутриимпульсной модуляцией (ЛЧМ, ФЧМ и т.д.). Так, например, сигналы с линейной частотной модуляцией могут быть созданы двумя способами: активным методом на основе управления мгновенной частотой автогенератора (или синтезатора частот), либо с помощью пассивного метода, который основан на взаимодействии бегущей волны с различными дисперсионными устройствами (ДУ), время групповой задержки сигнала в которых зависит от частоты [1]. На вход дисперсионного устройства с линейной зависимостью времени групповой задержки от частоты подается короткий возбуждающий импульс, спектральная плотность которого должна быть постоянной в рабочей полосе устройства. В результате на выходе ДУ получается ЛЧМ-импульс, длительность которого равно перепаду времени групповой задержки, а девиация частот — полосе частот, в которой происходит этот переход.

К явным преимуществам подобных пассивных методов генерации ЛЧМ-импульсов можно отнести:

- высокую стабильность параметров генерации;
- простоту построения устройства;
- возможность использования в качестве задающего генератора и согласованного фильтра приемника одних и тех же или однотипных пассивных устройств;
- когерентность формируемых зондирующих сигналов.

Также, на основе дисперсионных устройств могут быть построены генераторы сигналов с нелинейными законами внутриимпульсной модуляции. В этом случае необходимо использовать

дисперсионные устройства вид дисперсионной характеристики которых совпадает с законом нелинейной модуляции сигнала внутри формируемого импульса.

В случае использования дисперсионных устройств, которые имеют возможность управления во времени своей дисперсионной характеристикой либо электрическим полем, либо оптическим излучением, в этом случае возможно построение гидроакустических систем, которые имеют защиту от воздействия внешних активных коррелированных помех. Для этого в каждом зондирующем импульсе гидроакустической станции должен изменяться как закон внутримпульсной модуляции гидроакустического сигнала, так и параметры согласованного фильтра первичной обработки гидроакустического сигнала.

В качестве примера рассмотрим построение пассивного генератора импульсов гидроакустической станции с перестраиваемой внутримпульсной модуляцией на основе использования дисперсионного устройства. Такой генератор может быть реализован на основе входного фильтра с полосой пропускания  $\Delta\omega$  и центральной частотой  $\omega_0$ , стоящей за ним многоотводной линии задержки (или управляемой линии задержки) с интервалами задержки  $\Delta t$  и сумматора. Подобные управляемые генераторы можно использовать для формирования в гидроакустической системе частотно-манипулированных сигналов (по цифровому коду) или сигналов ЛЧМ. Анализируя различные методы схмотехнического построения блоков, осуществляющих формирование зондирующих сигналов в гидроакустических устройствах можно с уверенностью утверждать, что их можно реализовать на основе многоотводных или управляемых линий задержки или на дисперсионных устройствах. Для создания генераторов с перестраиваемыми параметрами сигнала требуется применение линий задержки с изменяемым временем задержки или использование дисперсионных устройств с управляемой во времени дисперсионной характеристикой.

Кроме того, при осуществлении когерентной обработки гидроакустического сигнала в приемнике необходимо компенсировать искажения, которые вызваны самой антенной системой и средой распространения акустического сигнала. Например искажения, обусловленные гидроакустической антенной, можно скорректировать включением последовательно с антеннами четырехполосников, ФЧХ которых равны по величине, но обратно по знаку ФЧХ антенны. Кроме того, произведение АЧХ четырехполосника на АЧХ антенны должно быть неизменно (постоянно) в рабочей полосе частот. Для решения этой проблемы в качестве фазовых корректоров могут быть использованы электрически или оптически управляемые дисперсионные устройства акустоэлектроники.

Для компенсации амплитудных и фазовых искажений гидроакустического сигнала, которые вызваны самой средой распространения сигнала можно использовать управляемые дисперсионные устройства. Методы обработки сигналов гидроакустических фазированных антенных решеток (ФАР) как правило основаны на различных вариантах спектральной обработки сигналов, полученных в результате последовательного суммирования отдельных сигналов с элементов ФАР. Для первичной цифровой обработки сигналов (ЦОС) в качестве спектроанализатора в таких гидроакустических системах применяют дисперсионные анализаторы спектра (ДАС), которые работают в реальном масштабе времени. Основой для построения таких спектроанализаторов являются акустоэлектронные или акустооптические дисперсионные устройства с линейной зависимостью времени групповой задержки от частоты. При построении гидроакустических станций с ФАР, работающих в ближней зоне для когерентного суммирования сигналов от целей, расположенных на различных дальностях необходимо вводить дополнительные приращения фаз сигналов, величины которых изменяются за время одного сканирования пространства. Ведение этих фазовых сдвигов, т.е. проведение операции перефокусировки гидроакустической антенны можно осуществлять при помощи многоотводных линий задержки или же на основе управляемых во времени дисперсионных элементов. В современных гидроакустических станциях весьма широко применяется оптимальная фильтрация сигналов. Целью оптимальной фильтрации сигналов является выделение полезного сигнала на фоне различных помех. Оптимальные или квазиоптимальные виды обработки гидроакустических сигналов можно разделить на когерентные и на некогерентные. При когерентной обработке сигналов учитывается фазовая структура сигнала, при квазикогерентной обработке сигнала учитывается только огибающая сигнала. Кроме того,

все основные виды обработки сигнала можно разделить на корреляционные, фильтровые и корреляционно-фильтровые.

При корреляционной обработке выходной сигнал описывается выражением [1]:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x)u_0(x+t)dx \quad (1)$$

где  $u_1(x)$  — входной сигнал;  $u_0(x)$  — опорный сигнал.

Реализуя корреляционный принцип обработки гидроакустического сигнала, приводит к тому, что необходимо использовать большое число опорных сигналов, которые различаются между собой по временному запаздыванию и степени временной трансформации, обусловленной эффектом Доплера. В этой связи, системы с корреляционной обработкой сигналов, как правило, состоят из большого числа каналов обработки сигналов и соответствующих им генераторов опорных сигналов [1]:

$$u(t, v_i, v_j) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(x)u_0((x+t)v_i, v_j, \tau_j)dx \quad (2)$$

где  $i=1, 2, 3...M$ ;  $j=1, 2, 3...N$ ;  $N$  — число Доплеровских каналов;  $M$  — число временных каналов;  $v_i$  — Доплеровские коэффициенты;  $\tau_j$  — время распространения зондирующих сигналов до  $j$ -й цели и обратно.

Фильтровые способы обработки сигналов позволяют значительно сократить число каналов обработки сигналов, что достигается пропусканием сигнала через фильтр с импульсной характеристикой, которая соответствует зеркально задержанному на время  $T$  изображению опорного сигнала. Другими словами, коэффициент передачи такого фильтра с точностью до постоянного множителя повторяет комплексно-сопряженное значение спектральной функции опорного сигнала с множителем  $\exp(-j\omega t)$ . Сигнал на выходе такого фильтра повторяет корреляционную функцию входного сигнала. Применение фильтровой обработки сигналов позволяет в одном канале произвести обработки сигналов от всех целей, находящихся на различных расстояниях. При этом число каналов будет равно числу измеряемых доплеровских скоростей целей.

При корреляционно-фильтровом методе обработке сигналов опорный сигнал представляется в виде произведения двух сигналов:  $u_0(t) = u_{01}(t)u_{02}(t)$ .

Поступающий сигнал на вход системы перемножается с первой составляющей опорного сигнала и далее результат обрабатывается фильтром, согласованным со второй составляющей опорного сигнала. Вычисление интеграла (2) производится сначала корреляционным, а уже потом фильтровым способом. Для реализации линейных или нелинейных оптимальных фильтров с заданными коэффициентами передачи или импульсными характеристиками необходимо использовать линии задержки или дисперсионные устройства. Проведя анализ основных аналоговых преобразований сигнала в системах гидроакустики можно утверждать, что для их реализации необходимы следующие типовые устройства функциональной электроники или функциональной фотоники:

- устройства задержки сигналов;
- многоотводные линии задержки;
- линии задержки с управляемой величиной времени задержки;
- дисперсионные устройства с фиксированной характеристикой;
- дисперсионные устройства с управляемой дисперсионной характеристикой;
- акустооптические процессоры корреляционной и спектральной обработки;
- акустоэлектронные процессоры корреляционной и спектральной обработки.

Интегрально-оптический анализатор спектра (рис. 1–3) представляет собой устройство, в котором анализ входного сигнала осуществляется с помощью пространственного Фурье-преобразования. Рассмотрим физические основы работы акустооптической ячейки, работающей в качестве спектроанализатора. При подаче на пьезопреобразователь исследуемого сигнала, в пьезопреобразователе генерируется акустическая волна, которая в свою очередь создает в светозвукопроводе изменяемую во времени дифракционную решетку. Когерентный монохроматический свет, падающий под углом Брэгга на светозвукопровод, дифрагирует на

оптических неоднородностях, обусловленных динамической дифракционной решеткой, и отклоняется от первоначального направления на угол, пропорциональный частоте входного сигнала. Таким образом, на линейке фотоприемников формируется оптический пространственный аналог входного сигнала в виде дифракционной картины. Распределение интенсивности в этой картине будет пропорционально взвешенному спектру мощности входного радиосигнала. Возможность получения высокой дифракционной эффективности акустооптического взаимодействия поверхностных акустических волн (ПАВ) открывает широкие возможности в создании интегрально-оптических спектроанализаторов по тонкопленочной технологии. Это, прежде всего, обусловлено тем, что собственно акустооптическое взаимодействие происходит в тонком слое интегрально-оптического светозвукопровода, толщина которого соизмерима с длиной волны света, падающего на светозвукопровод. В этой связи плотность мощности в зоне акустооптического взаимодействия получается очень большой, практически недостижимой в дискретных устройствах акустооптики. Обычно используемыми материалами для подложки спектроанализатора являются монокристаллический кремний или ниобат лития. В свою очередь, так как монокристаллический кремний не обладает пьезоактивностью, то для реализации акустического тракта необходимо формировать светозвукопровод из ZnO, который прозрачен в широкой спектральной полосе видимого света и УФ (ВУФ) и является пьезополупроводником. С другой стороны, использование в качестве подложки монокристаллического кремния позволяет прямо на подложке формировать линейку фотоприемников ВУФ диапазона спектра на основе планарной кремниевой технологии. Кроме того, применение пленочных линз Люнеберга или пленочных дифракционных линз позволяет существенно снизить сферические абберации в сравнении с использованием геодезических линз. Использование в качестве подложки монокристаллического ниобата лития, обладающего высокими электрооптическими свойствами, позволяет создавать сугубо на его основе, без формирования поверхностных тонкопленочных слоев, акустооптические приборы с малой управляющей мощностью и малыми акустическими потерями. Однако существует не решенная на сегодняшний день проблема: в ниобате лития весьма сложна операция формирования устройства светозвукопровода (заглубленного волновода). Вследствие высоких температур необходимых для диффузии легирующей примеси в приповерхностный слой ниобата лития происходит разрушение топологии остальных элементов интегрально-оптического устройства (оптической микросхемы). Кроме того, вследствие высокой прочности монокристаллического ниобата лития вызывает затруднение формирование на подложке геодезических линз или линз Люнеберга. Переход на фокусирующие элементы дифракционного типа в виде линз Френеля и дифракционных решеток с переменным периодом, а также применение безлинзовых структур интегральной оптики, работающих на линейном электрооптическом эффекте, позволяет существенно упростить технологию создания интегрально-оптических спектроанализаторов. На рис. 1 приведена топология интегрально-оптического спектроанализатора, изготовленного на поверхности структуры Si-SiO<sub>2</sub> с применением кремниевой планарной и тонкопленочной технологий. Толщина монокристаллической кремниевой пластины составляет 120 мкм. На поверхности монокристаллического кремния был выращен слой диоксида кремния во влажном кислороде, толщиной 650 нм. Далее на поверхность из диоксида кремния был сформирован планарный волновод-светозвукопровод из тонкой пленки ZnO, толщина которой составила 5.0 мкм. Формирование тонкой пленки ZnO было проведено методом лазерной абляции высокочистой металлической мишени (ZnO) в среде газа-окислителя [2–6]. На поверхности светозвукопровода методом прецизионной лазерной гравировки были сформированы ВШЭ электроакустического преобразователя. Плоские градиентные линзы Френеля были сформированы из халькогенидного стекла As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> на поверхности ZnO с помощью лазерной абляции мишени As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> и ее последующей лазерной гравировки. Фокусное расстояние линз составляло 4.5 мм. Дифракционная эффективность линз составила 92 % при приложенной мощности управляющего сигнала 210 мВт. В качестве лазерного излучателя был использован чип-лазер на длину волны 850 нм. Приемная линейка фотодиодов формировалась в приповерхностном слое кремния по стандартной планарной технологии. Количество фотодиодов в линейке составляло 1024, размер приемной площадки одного фотодиода составил около 5 мкм. Основная трудность заключалась в сопряжении апертур чип-лазера и планарного волновода (световода) из оксида цинка.

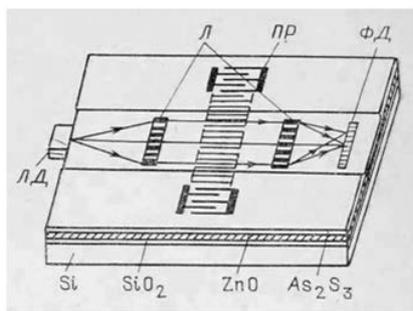


Рис. 1. Интегральный акустооптический спектроанализатор на кремниевой подложке.

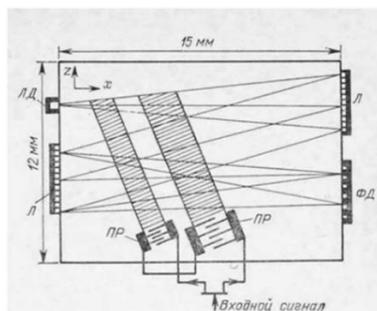


Рис. 2. Интегральный акустооптический спектроанализатор с дифракционными решеточными линзами переменного периода.

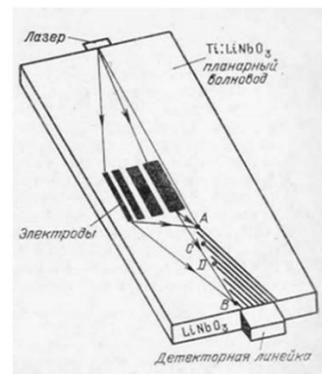


Рис. 3. Интегральный безлинзовый спектроанализатор на электрооптическом эффекте.

Геометрические размеры интегрально-оптического спектроанализатора составили  $65 \times 25$  мм. Диапазон частот несущих лежал в диапазоне от 280 МГц до 350 МГц. Для анализа гидроакустических сигналов проводился их сдвиг по частоте вверх в смесителе на основе аналогового умножителя на ВЧ полевых транзисторах.

Использование фокусирующих элементов в виде дифракционной решетки с переменным периодом позволяет отказаться от прецизионной литографической технологии в формировании микрооптических элементов на поверхности и в приповерхностной области и полностью использовать лазерные технологии микрообработки поверхности в едином технологическом цикле. На рис. 2 приведена топология интегрально-оптического спектроанализатора, в котором вместо сложных в изготовлении объемных микролинз были использованы планарные Брэгговские дифракционные линзы с переменным периодом. Использование неосевого характера фокусировки позволило существенно уменьшить размеры подложки, в сравнении с аналогичным интегрально-оптическим спектроанализатором, в котором были применены элементы микрооптики. Брэгговские линзы изготовлены по планарной технологии на структуре Si-SiO<sub>2</sub>. Далее они встык соединены с планарными волноводами, сформированными на поверхности монокристаллического ниобата лития. В данном случае Брэгговские линзы работали на отражение. С целью расширения полосы рабочих частот спектроанализатора была использована система из двух преобразователей поверхностных акустических волн (ПАВ), у которых встречно-штыревые электроды (ВШЭ) имеют разные центральные частоты. В этом случае пучок света, распространяющийся по планарному световоду, последовательно взаимодействует с ПАВ от каждого электроакустического преобразователя. Нужно подчеркнуть, что поверхностная акустическая волна от второго электроакустического преобразователя взаимодействует с недефрагированной оптической волной от первого преобразователя. Центральная полоса первого преобразователя составила 485 МГц, центральная полоса второго преобразователя составила 1000 МГц. Это позволило получить рабочую полосу частот спектроанализатора от 310 МГц до 1310 МГц. Для работы с гидроакустическими сигналами в нем также как и в предыдущем спектроанализаторе проводился сдвиг акустических сигналов по частоте вверх в смесителе на основе аналогового умножителя на ВЧ полевых транзисторах.

Альтернативным подходом к созданию интегрально-оптического спектроанализатора сигналов без микрооптических линз Люнеберга или геодезических линз является подход в использовании линейного электрооптического эффекта. В этом случае, свет от чип-лазера, введенный в планарный световод, дифрагирует на оптических неоднородностях, которые обусловлены изменением величины показателя преломления материала световода из-за наличия линейного электрооптического эффекта в материале световода. На рис. 3 приведен пример создания безлинзового интегрально оптического анализатора на электрооптическом эффекте. При распространении света в планарном волноводе, нанесенные на поверхность волновода металлические электроды, собственно, и формирующие матрицу электрооптического

преобразователя, подключены к разным напряжениям. Эти напряжения создают за счет электрооптического эффекта в планарном волноводе ряд областей с различным показателем преломления, которые работают как набор накладываемых друг на друга зонных пластинок. В этом случае каждая область с различным показателем преломления среды планарного волновода фокусирует падающую на нее световую волну в различных точках вдоль оптической оси (точки А, В, С на рис. 3). В этом случае система электродов работает как пространственный модулятор света, и результирующая интенсивность света на входе фотодетектора представляет собой взвешенное дискретное Фурье-преобразование, приложенного к матрице электродов напряжения.

Электрооптический анализатор в сравнении с акустооптическим анализатором обладает большей гибкостью в настройке и большей функциональностью, так как у него фиксировано только произведение времени на полосу частот. Это позволяет проводить анализ волновых процессов в широком диапазоне форм волн (синусоидальные, цифровые, шумовые) и с различными частотами. Кроме того, электрооптический анализатор позволяет проводить анализ, создавая параллельную аналоговую обработку, что в результате может быть использовано в параллельных аналоговых вычислительных устройствах.

Таким образом для первичной цифровой обработки сигналов в гидроакустике, в качестве спектральных анализаторов, перспективно применение интегрально-оптических приборов акустооптики и акустоэлектроники, которые позволяют проводить обработку гидроакустической информации в реальном масштабе времени. Для построения основных блоков обработки аналоговых сигналов в гидроакустических системах могут быть использованы следующие типовые устройства акустоэлектроники: устройства задержки сигналов, многоотводные линии задержки, линии задержки с управляемой величиной времени задержки, дисперсионные устройства с фиксированной характеристикой, дисперсионные устройства с управляемой дисперсионной характеристикой.

#### *Литература*

1. Рогачев В. И., Петров П. Н., Кравец В. С., Кулаков С. В. Акустоэлектронные устройства обработки гидроакустических сигналов. СПб.: Судостроение, 1993. 184 с.
2. Grigor'ev L. V., Egorova Y. B., Bykov N. A., Semenov A. A., Nikitin A. A. Optical and Photoluminescent Properties of Thin-Film ZnO–PLZT Structure in the UV and Visible Spectral Regions // Optics and spectroscopy. 2019. Vol. 127, №. 6. P. 1080–1084.
3. Grigoryev L. V., Shakin O. V., Nefedov V. G., Mikhailov A. V. Ultraviolet photodetector based on a ZnS–ZnO structure with a surface acoustic wave // J. of Optical Technology. 2019. Vol. 86, No. 3. P. 183–1865.
4. Grigoryev L. V., Morozov I. S., Zhuravlev N. V., Semenov A. A., Nikitin A. A. Photoluminescence and Photoelectric Properties of the ZnO–LiNbO<sub>3</sub> Thin-Film Structure in the Ultraviolet and Visible Spectral Regions // Semiconductors. 2020. Vol. 54, № 3. P. 285–290.
5. Григорьев Л. В., Семенов А. А., Михайлов А. В. Структурные и фотоэлектрические свойства тонких пленок оксида цинка на подложке танталата лития // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55, № 12. С. 1180–1185.
6. Григорьев Л. В., Семенов А. А., Михайлов А. В. Оптические и фотолюминесцентные свойства тонкой пленки оксида цинка на подложке из тантала лития // Оптика и Спектроскопия. 2022. Т. 130. Вып. 2. С. 242–248.

## ИНЖЕНЕРНАЯ МАТЕМАТИКА ДИНАМИКИ, ЭНЕРГЕТИКИ И СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССОВ В ОКЕАНЕ

Ю. Д. Чашечкин, д-р физ.-мат. наук

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

## ENGINEERING MATHEMATICS OF DYNAMICS, ENERGETICS AND STRUCTURE OF PROCESSES IN THE OCEAN

Yu. D. Chashechkin, Dr.Sc.

A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

*Для описания каскада взаимообусловленных процессов в океане с учетом внешних воздействий различного масштаба — от атомно-молекулярных до астрономических в рамках инженерной математики — аксиоматической науки о принципах выбора символов, правил операций и критериев контроля точности, привлекается система фундаментальных уравнений переноса вещества, импульса и энергии, которая замыкается уравнениями состояния для потенциала Гиббса, плотности, скорости звука и других физических величин. Система анализируется с учетом условия совместности. Приводятся примеры наблюдений, расчета и моделирования различных видов течений.*

*To describe the cascade of interdependent processes in the ocean, taking into account external influences of various scales — from atomic-molecular to astronomical sizes within the framework of engineering mathematics that is an axiomatic science for the principles of choosing symbols, rules of operations and criteria for controlling accuracy, a system of fundamental equations for the transfer of matter, momentum and energy is used, which is closed by the equations of state for the Gibbs potential, density, velocity of sound, and other physical quantities. The system is analyzed taking into account the compatibility condition. Examples of observations, calculation and modeling of various types of flows are given.*

По мере роста численности населения Земли, развития экономики, наук и технологий, роль океанов и морей неуклонно возрастает. Соответственно, все больше усилий прилагается к изучению их динамики и влияния на все стороны жизни человечества. Ценность результатов изучения океанов заметно повысилась в последние годы вследствие роста числа экстремальных погодных условий и необходимости объективной оценки степени возможной изменчивости климата.

Развитие технологий расширяет число инструментов для измерения параметров состояния и динамики морских процессов, методов проведения измерений, которые в последние годы дополнились большим числом дистанционных инструментов наземного, корабельного, авиационного и космического базирования. Одновременно расширяется ряд методов контактных измерений — корабельных, буйковых и стационарных, число которых заметно выросло с появлением стационарных морских платформ добычи углеводородов, размещения ветроэлектростанций, развития аквакультуры.

Развитие вычислительной техники позволило начать решение проблем глобальной динамики океана, как изолированного объекта гидросферы, так и с учетом различных форм взаимодействий с литосферой и атмосферой, а также действия космических факторов.

Однако полученные результаты не всегда отвечают на запросы практики, особенно в таких важных разделах как прогноз экстремальных динамических состояний атмосферы и гидросферы, локализации и траекторий последующего перемещения наиболее активных участков.

Среди многих причин сложившейся ситуации можно отметить раздробленность и многообразие различных разделов морской науки в целом и даже ее одной части — гидродинамики. Отдельно изучаются волны (инерциальные, внутренние и поверхностные гравитационные и капиллярные), вихри, течения, турбулентность, распространение света и звука, многие другие темы. В каждом из разделов существуют свои уравнения и методы их решения, причем математические свойства моделей существенно различаются. Соответственно, различаются и инструменты измерений процессов и методики их применения. Как результат, величины, обозначаемые одинаковыми символами, оказываются имеющими разный смысл и математически неприводимые к общему виду.

Отдельного внимания заслуживает анализ метрологии измерений, определения погрешности данных, особенно в морских условиях, где характер взаимодействия инструментов

со средой зависит и от ее физических свойств (например, температуры, степени насыщенности газом) и динамического состояния (стратификации и характера течений).

Наряду с аналитическим и численным моделированием процессов в океане, традиционно, с работ Ж. Даламбера, С. Рассела, У. Фруда, В. Экмана, А. Н. Крылова развивается лабораторное моделирование морских процессов, вначале применительно к задачам судостроения и волновым явлениям, а со второй половины прошлого века — в более широкой постановке. Соответственно, одной из актуальных задач морской науки становится установление связи между различными подходами, правил объединения методически различных подходов и переноса результатов лабораторных опытов на природные условия.

Современные исследования течений жидкостей и газов проводятся в рамках **Инженерной математики** — аксиоматической науки о принципах выбора символов, правил операций и критериев контроля точности, а также сопряженной дисциплины — **Технической физики** — эмпирио-аксиоматической науки о выборе физических величин, методов их измерений и оценки погрешности [1, 2]. Ключевым здесь является соответствие математического и физического содержания вводимых величин и возможность их измерения, то есть определения значения с одновременной оценкой погрешности.

В качестве примера можно указать, что *скорость жидкости/газа* — не наблюдаемая величина вследствие невозможности идентификации «жидкой частицы». Внесение в поток маркера — твердой частицы, газового пузырька или несмешивающейся жидкой капельки нарушает однородность изучаемой среды. Твердая частица нейтральной плавучести переносится потоком и одновременно вертится относительно собственного центра, что заметил еще Декарт и использовал в качестве признака вихря [3]. Жидкая частица расщепляется на волокна, часть которых опережает несущий поток, а часть — отстает. Мелкая частица подвержена броуновскому хаотическому движению. Введение зондирующего акустического поля изменяет распределение давления и создает внутренние течения, а светового — нарушает однородность температуры. Степень «пассивности» маркеров и их влияния на свойства течения зависит от локальных условий и общей оценке не поддается.

Базовые физические величины выбираются из условия соответствия понятиям инженерной математики и принципа наблюдаемости — возможности объективной оценки точности в процессе измерений значения с привлечением условия избыточности — сравнения независимо определенных значений изучаемой физической величины. В качестве примера можно указать сравнение величины непосредственно измеренной плотности и рассчитанной по данным измерений давления, температуры, концентрации, скорости звука, коэффициента преломления с учетом материальных уравнений состояния.

Математический базис теории течений составляют понятия вещественного числа и непрерывного векторного трехмерного, метрического (евклидового), однородного, изотропного пространства с декартовой системой координат  $(x, y, z)$ . Его инварианты — расстояния.

*Движение* определяется как *ортогональное преобразование метрического пространства в себя с непрерывным параметром  $t$  с сохранением расстояний между точками и относительного расположения объектов*. Движению в евклидовом пространстве соответствует группа преобразований с независимыми подгруппами перемещений и вращений. Параметры движения — положение, скорость и ускорение точки.

В пространство погружается сплошная (непрерывная) среда плотностью  $\rho(\mathbf{x}, t)$ , определяющей ее инерционные, гравитационные, физические, термодинамические, химические и другие свойства. Общую основу построения теории и методики эксперимента в инженерной математике и технической физике составляют законы сохранения базовых величин — вектора импульса  $\mathbf{p} = \rho \mathbf{v}$  и скаляра полной энергии  $E_t$  [1], обобщающие исторический опыт существования и неизменности материи с плотностью  $\rho(\mathbf{x}, t)$ .

Основной параметр среды — внутренняя энергия, для описания которой выбран потенциал Гиббса (производная потенциала по давлению определяет плотность [4]). Подвижные атомы и молекулы жидкости объединяются в группы (кластеры) размером  $\delta_c \sim 10^{-6} \dots 10^{-7}$  см и в более сложные структуры — войды, клатраты, сборки, каждая из которых характеризуется собственной внутренней энергией и потенциалом Гиббса.

Соответственно, динамику течений определяют различные механизмы передачи энергии: перенос со скоростью потока  $v_i$ , с групповой скоростью волн  $c_w$ , медленными диффузионными процессами с характерной скоростью  $c_d$  и быстрыми прямыми атомно-молекулярными процессами со скоростью  $c_a$ , и трансформации из латентной формы потенциальной энергии в возмущения давления, температуры, скорости тонких течений при уничтожении свободной поверхности сливающихся жидкостей или границ внутренних структур [5].

С учетом строения, механических, физических и других свойств, среда, обладающая свойством текучести, характеризуемая термодинамическими потенциалами, их производными — термодинамическими величинами, кинетическими и другими физическими коэффициентами (в частности, определяющими распространение электромагнитных или акустических волн), называется жидкостью, если занимает конечный объем, или газом, если заполняет все пространство.

Течение определяется как перенос импульса, энергии и вещества, сопровождающийся самосогласованными изменениями физических величин среды. Перенос энергии и вещества называется процессом (например, диффузия вещества или тепла). В приближении сплошной среды течения описываются системой дифференциальных уравнений неразрывности, переноса импульса, тепла и вещества, дополненной замыкающими уравнениями состояния для потенциала жидкости и плотности с физически обоснованными начальными и граничными условиями.

Система уравнений анализируется с учетом условия совместности, определяющего ее ранг, порядок линеаризованной версии и степень характеристического (дисперсионного) уравнения. В линейном приближении, с учетом малости диссипативных коэффициентов, система решается методами теории сингулярных возмущений. Регулярные составляющие периодических возмущений описывают известные волны — инерционные во вращающихся жидкостях, внутренние и поверхностные гравитационные — в стратифицированных средах, акустические — в сжимаемых, а также промежуточные гибридные формы.

Сингулярные решения описывают семейства лигаментов, как специальных, независимо определяемых эффектами вязкости, температуропроводности или диффузии, так и более сложных комбинационных [6]. В эксперименте лигаментам соответствуют тонкие волокна и прослойки, поперечные размеры которых определяются кинетическими коэффициентами и временем установления, или частотой, или скоростью течения. Учет лигаментов позволяет переходить от дискретного атомно-молекулярного описания течений к модели сплошной среды, использующейся в механике и термодинамике течений жидкостей и газов.

Лигаменты — наиболее распространенные компоненты, образующие тонкую структуру течения, нелинейно взаимодействуют между собой, с регулярными компонентами и общим потоком [7]. Наиболее выразительные формы лигаменты образуют в капельных течениях при слиянии нейтральных или химически реагирующих жидкостей [8] (эксперименты проводились на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН» [9]).

Аналитические исследования решений системы фундаментальных уравнений позволяют разработать согласованные методики численного и лабораторного моделирования течений и детально изучить динамику и структуру течения однородной (актуально и потенциально) и стратифицированной (сильно и слабо) жидкости. В качестве примера в единой постановке рассмотрена задача обтекания полосы в полном диапазоне углов атаки и в широком интервале скоростей, включающем течения, индуцированные диффузией на неподвижном препятствии ( $Re = UL/\nu \sim 1$ ), и нестационарные вихревые режимы при  $Re \sim 100\,000$  (здесь и далее  $L$ ,  $U$  — длина и скорость тела относительно прилегающей жидкости,  $\nu$  — кинематическая вязкость).

Математическое моделирование данной задачи проводится на основе предельно редуцированной системы уравнений механики несжимаемой непрерывно стратифицированной жидкости [2], включающей уравнение переноса импульса с учетом гравитационной силы в приближении Буссинеска, уравнения диффузии для стратифицирующего компонента, неразрывности и замыкающее линеаризованное уравнение состояния:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{v} &= 0; \quad \Lambda = |d \ln \rho / dz|^{-1}; \quad N = \sqrt{g / \rho \cdot d\rho / dz}, \quad T_b = 2\pi / N; \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}(\nabla \cdot \mathbf{v}) &= -\frac{1}{\rho_{00}} \nabla P + \nu \Delta \mathbf{v} - \mathbf{sg}; \\ \frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s &= \kappa_s \Delta s + \frac{v_z}{\Lambda}. \end{aligned} \quad (1)$$

Обозначения стандартные:  $\mathbf{v}$  — скорость жидкости;  $\rho = \rho_{00}(\exp(-z/\Lambda) + s)$  — исходная плотность и ее возмущение;  $\Lambda = |d \ln \rho / dz|^{-1}$  — масштаб;  $N = \sqrt{g / \Lambda}$  — частота;  $T_b = 2\pi / N$  — период плавучести;  $\mathbf{g}$  — ускорение свободного падения;  $P$  — давление;  $\kappa_s$  — коэффициент диффузии стратифицирующей компоненты;  $\Delta$  — оператор Лапласа, коэффициент солевого сжатия включен в определение солёности [10]. Система (1), дополненная физически обоснованными начальными и граничными условиями — прилипания для скорости и непротекания для вещества и плотности, позволяет рассчитывать динамику структуры течения в широком диапазоне параметров течения, включающего и ползучие, индуцированные диффузией на неподвижном препятствии [10], и нестационарные вихревые режимы без привлечения дополнительных гипотез, уравнений и констант.

В качестве начальных условий в задаче обтекания выбираются установившиеся течения, индуцированные диффузией на неподвижном теле выбранной формы.

Полные решения системы уравнений (1) восьмого ранга содержат по крайней мере восемь независимых функций, составляющих полное решение. Набор функций характеризуется пространственными и временными масштабами физической и геометрической природы. В их число входят такие крупные, как масштаб плавучести  $\Lambda = |d \ln \rho / dz|^{-1}$ , размер тела  $L$ , длина присоединенной внутренней волны  $\lambda = UT_b$ , вязкий волновой масштаб  $L_v = \sqrt[3]{g\nu / N}$ . Поперечные масштабы тонких функций — лигаментов [6] определяются кинетическими коэффициентами и частотой плавучести среды  $\delta_N^v = \sqrt{\nu / N}$ ,  $\delta_N^{\kappa_s} = \sqrt{\kappa_s / N}$  или частотой волны  $\delta_\omega^v = \sqrt{\nu / \omega}$ ,  $\delta_\omega^{\kappa_s} = \sqrt{\kappa_s / \omega}$ , а также скоростью тела  $\delta_U^v = \nu / U$ ,  $\delta_U^{\kappa_s} = \kappa_s / U$ . Масштаб нестационарных лигаментов, первичных структурных компонентов, которые начинают формироваться с началом движения тела, определяется временем установления течения  $\delta_t^v = \sqrt{\nu \cdot \Delta t}$ , и  $\delta_t^{\kappa_s} = \sqrt{\kappa_s \cdot \Delta t}$ . Именно нестационарные лигаменты, связывающие процессы на кластерно-молекулярном и макроскопическом уровнях, первыми появляются в картине течений.

В число временных масштабов входят период плавучести  $T_b$ , кинематический масштаб движения тела  $T_U = L / U$  и большое число производных масштабов, и продолжительных, и коротких, образованных отношением линейных масштабов к скорости тела  $T_\delta^i = \delta_k^i / U$ . Соответственно, в течении наблюдаются и долгоживущие медленно эволюционирующие компоненты, и быстропеременные тонкие. Все одновременно сосуществующие структурные компоненты нелинейно взаимодействуют между собой и со средним течением [7], и со временем порождают новые компоненты и вихри. Диссипативные факторы вызывают неоднородное затухание компонентов течений. Наложение большого числа непропорциональных компонентов проявляется в сильных флуктуациях суммарных значений регистрируемых параметров.

Параметры структурных компонентов определяют требования к методике эксперимента — размеру поля наблюдения, которое должно включать крупные компоненты, пространственной структуры, и временной разрешающей способности инструментов, которые должны выделять компоненты изменчивой тонкой структуры и численным кодам.

Система (1) решается путем прямого численного моделирования методом конечного объема с использованием вычислительного пакета OpenFOAM, в рамках которого Я. В. Загуменный разработал собственные решатели для расчета стратифицированных течений, составления библиотек динамических расчетных сеток, позволяющих согласовывать перемещение узлов сетки в соответствии с движением препятствия, а также специальные утилиты для обработки и визуализации результатов численных расчетов [10].

Проведенные комплексные сравнения рассчитанных и теневых картин течений стратифицированной и однородной жидкости вокруг наклонной пластины показали достаточно хорошую качественную согласованность численных и экспериментальных результатов (рис. 1). Как лабораторное, так и численное моделирование показывают, что структура течения включает опережающее возмущение, поля опережающих нестационарных и присоединенных внутренних волн, сопутствующего следа. В картине течения за наклонной пластиной выражена характерная вихревая дорожка в форме последовательности грибовидных структур. В отличие от однородной жидкости, в которой вихревая дорожка в определенной степени расширяется вниз по потоку в рамках поля наблюдения, в стратифицированной среде сопутствующие вихри постепенно коллапсируют и распадаются на тонкоструктурные лигаменты.

Зависимости от времени интегральных характеристик — коэффициентов сопротивления и подъемной силы наклонной пластины имеют существенно нестационарный осциллирующий характер, соответствующий частоте вихреобразования в следе за пластиной (рис. 2).

Приведенные временные зависимости для двух различных значений частоты плавучести жидкости показывают, что частота вихреобразования слабо зависит от величины стратификации, но при этом существенно изменяется при варьировании углом наклона пластины к горизонту: при увеличении угла почти в три раза частота вихреобразования уменьшается примерно вдвое, при этом амплитуда осцилляций увеличивается почти на порядок. В режиме интенсивной генерации спутных вихревых структур значения интегральных характеристик пластины и амплитуды их осцилляций уменьшаются с увеличением частоты плавучести жидкости, что объясняется разрушительным влиянием стратификации на вихревые образования с соответствующим уменьшением вихревой компоненты полного сопротивления, которая является доминирующей для данного режима течения.

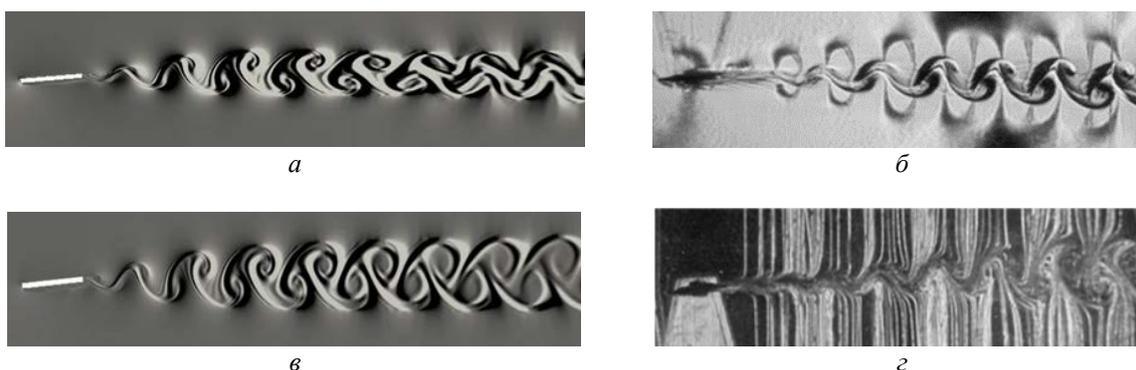


Рис. 1. Рассчитанные (*a, в*) и теневые картины (*б, з*) течений за пластиной.

$$L = 2,5 \text{ см}, U = 4,3 \text{ см/с}, \alpha = 6^\circ; a, б — N = 0,83 \text{ с}^{-1}; в, з — N = 0,0.$$

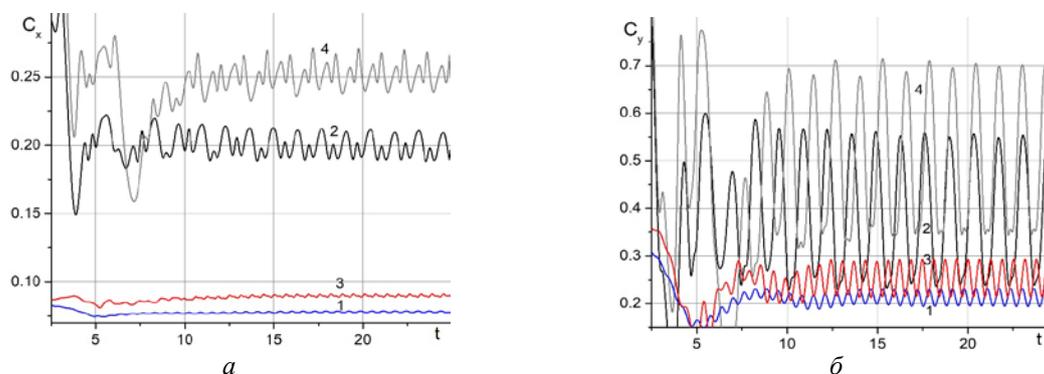


Рис. 2. Интегральные коэффициенты сопротивления (*a*) и подъемной силы (*б*) наклонной пластины в стратифицированной и однородной жидкостях как функции времени.

$$L = 2,5 \text{ см}, N = 0,83 \text{ с}^{-1}; 1 — U = 4,3 \text{ см/с}, \alpha = 6^\circ, Fr = 2,07; 2 — U = 3,6 \text{ см/с}, \alpha = 16^\circ, Fr = 1,74;$$

$$L = 2,5 \text{ см}, N = 10^{-5} \text{ с}^{-1}; 3 — U = 4,3 \text{ см/с}, \alpha = 6^\circ, Fr = 1,7 \cdot 10^5; 4 — U = 3,6 \text{ см/с}, \alpha = 16^\circ, Fr = 1,4 \cdot 10^5.$$

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Более полное описание течений, учитывающее передачу и трансформацию внутренней энергии стратифицированной среды, требует расширения системы фундаментальных уравнений, добавления уравнений, учитывающих перенос энергии (или, при малых вариациях — температуры), включения в число замыкающих уравнений состояния для потенциала Гиббса и плотности. Повышение ранга системы расширяет число базовых функций, характеризующих динамику, энергетiku и структуру течений, а также число сценариев эволюции течений.

Реализация условия избыточности при выборе состава измерительных систем позволяет измерять базовые параметры течений независимыми способами, проводить оценку точности расчетов, погрешности экспериментов и степени согласованности результатов. Подход допускает прямой перенос результатов на природные и технические условия без привлечения дополнительных гипотез и констант.

### *Литература*

1. Чашечкин Ю. Д. Дифференциальная механика жидкостей: согласованные аналитические, численные и лабораторные модели стратифицированных течений // Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2014. № 6. С. 67–95. <http://vestniken.ru/eng/catalog/mech/hidden/547.html>.
2. Chashechkin Yu. D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. V. 10. 286 p. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>.
3. Chashechkin Yu. D. Differential fluid mechanics — harmonization of analytical, numerical and laboratory models of flows // Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures. Springer Series «Computational Methods in Applied Sciences». 2016. V. 40. 328 p. P. 61–91. DOI: 10.1007/978-3-319-23564-6-5.
4. Feistel R. et al. Advisory Note No. 6: Relationship between IAPWS documents and the International Thermodynamic Equation of Seawater – 2010 (TEOS-10). 2016. P. 1–5.
5. Чашечкин Ю. Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2021. № 1(94). С. 73–92. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-91>.
6. Chashechkin Yu. D. Singularly perturbed components of flows – linear precursors of shock waves // Math. Model. Nat. Phenom. 2018. V. 13(2). P. 1–29. <https://doi.org/10.1051/mmnp/2018020>.
7. Chashechkin Yu. D. Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // Mathematics. 2021. V. 9. № 586. <https://doi.org/10.3390/math9060586>.
8. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Визуализация областей контакта сред в течениях импакта капли с химическими реакциями // Докл. Российской академии наук «Физика, технические науки». 2021. Т. 500. С. 39–47. DOI: 10.31857/S2686740021050023.
9. УИУ «ГФК ИПМех РАН». Сайт: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
10. Chashechkin Yu. D., Zagumennyi I. V. 2D hydrodynamics of a plate: from creeping flow to transient vortex regimes // Fluids. 2021. V.6. 310. <https://doi.org/10.3390/fluids6090310>.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-19-00598, <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>). Опыты проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН».

## НЕЛОКАЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА. ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ РЕАЛЬНЫХ СРЕД

Т. А. Хантулева, д-р физ.-мат. наук, А. А. Родионов<sup>1,2</sup>, чл.-корр. РАН  
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

## NONLOCAL HYDRODYNAMICS. APPROCHES TO DESCRIBE TURBULENT FLOWS OF REAL MEDIA

T. A. Khantuleva, Dr.Sc., A. A. Rodionov<sup>1,2</sup>, corresponding member of RAS  
Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg Scientific Center of the RAS, St. Petersburg, Russia

*Проблема турбулентности остается одной из важнейших нерешенных проблем физики. Разработанные модели и численные методы расчета турбулентных течений, опираясь на околоравновесную концепцию сплошной среды, не обладают предсказательной способностью, поскольку турбулентные процессы сильно неравновесны. Цель данной работы — обсудить подходы к решению этой проблемы с позиций нелокальной гидродинамики, построенной на основе результатов неравновесной статистической механики и теории управления адаптивными системами. Показано, что математическая модель турбулентного течения с эволюционирующей динамической структурой отражает все известные особенности турбулентности.*

*The problem of turbulence remains one of the most important unsolved problems in physics. The developed models and numerical methods for calculating turbulent flows, based on the near-equilibrium concept of a continuous medium, do not have a predictive ability, since turbulent processes are highly non-equilibrium. The purpose of this work is to discuss approaches to solving this problem from the standpoint of nonlocal hydrodynamics, built on the basis of the results of nonequilibrium statistical mechanics and the theory of control of adaptive systems. It is shown that the mathematical model of a turbulent flow with an evolving dynamic structure reflects all known features of turbulence.*

**Проблема описания турбулентности.** Проблема турбулентности до сих пор остается одной из важнейших нерешенных проблем классической физики. За последние десятилетия ученым так и не удалось найти надежный способ прогнозирования поведения турбулентных течений. Проявления физической природы турбулентности оказались столь многообразны и изменчивы, что создать какую-либо универсальную модель турбулентности в принципе вряд ли возможно. Непонимание этой природы сформировало представление о том, что определяющей чертой турбулентного движения является его хаотичный, случайный характер. Такое ошибочное представление просуществовало в науке достаточно долго и, хотя послужило основой построения статистических подходов к описанию этого явления, создавало препятствие на пути построения теории турбулентности.

Однако, еще во второй половине прошлого века было показано, что турбулентные движения представляют собой упорядоченные динамические структуры, и производство энтропии при турбулентном движении меньше, чем при ламинарном [1, 2]. Возникло новое представление о турбулентности как о синергетическом процессе самоорганизации многомасштабных динамических структур, протекающем вдали от локального термодинамического равновесия. Однако, такое более глубокое понимание всей сложности явления турбулентности только увеличило число возникающих проблем при попытках его моделирования.

Принято считать, что источником турбулентности является высокоскоростное взаимодействие среды с межфазными границами, при котором возникают большие пространственные градиенты массовой скорости. При переходе к турбулентному режиму движения среды диффузионные механизмы переноса импульса замещаются конвективными и волновыми, а диссипативные эффекты вытесняются инерционными эффектами. В работе [3] показано, что сдвиговое движение среды, основанное на вязком взаимодействии слоев, не может существовать при больших пространственных градиентах скорости и должно быть

преобразовано во вращательное движение через формирование вихревых структур. Однако, синергетические подходы к процессам самоорганизации турбулентных структур также не привели к успеху. Возникновение таких структур имеет место одновременно на разных масштабных уровнях, и обменные процессы между ними, приводящие к временной эволюции системы, затрудняют выбор параметров порядка. Но основная причина неудач кроется не в синергетике.

Как известно, вся термодинамика макроскопических систем основана на концепции термодинамического равновесия. Обобщение термодинамики на случай малых отклонений от локального термодинамического равновесия породило механику сплошных сред, модели которой работают при условии малых пространственных градиентов и скоростей процессов [4]. Все попытки обобщить известные модели механики сплошных сред на существенно неравновесные процессы за счет добавления нелинейных членов, высших градиентов или дополнительных эффектов, как показала практика, заведомо сужают их область применимости и лишают их предсказательной способности.

Разработанные к настоящему времени модели турбулентных течений жидкости также основаны на представлениях механики сплошной среды и обладают всеми выше перечисленными недостатками.

**Недостатки численных методов расчета турбулентных течений.** Моделирование турбулентных течений опирается на гидродинамические уравнения Навье–Стокса, которые осредняются по методу Рейнольдса. При этом встаёт проблема замыкания системы осреднённых уравнений, для решения которой требуется физически обоснованная математическая модель, которая позволяет выразить искомые корреляции через средние значения и корреляции более низкого порядка. В настоящее время для описания турбулентных течений жидкости разработано несколько моделей замыкания осреднённых гидродинамических уравнений. Такие модельные уравнения решаются различными численными методами.

При больших числах Рейнольдса для полностью развитой турбулентности методы численного моделирования требуют постановки специальных граничных условий не на твёрдой поверхности, а на внешней границе пристеночного вязкого подслоя, в котором турбулентность затухает. Для этого используют метод пристеночных функций, который позволяет использовать расчетные сетки с достаточно крупными ячейками. Однако, если характер течения не соответствует допущениям, сделанным при построении пристеночных функций, данный подход может привести к неприемлемым ошибкам в расчёте напряжения на стенке.

Пригодные для небольших чисел Рейнольдса модели справедливы во всей расчётной области, включая пристеночные зоны. Течения при умеренных и малых числах Рейнольдса особенно трудны для численного моделирования, если в расчётной области имеет место ламинарно-турбулентный переход. В связи с тем, что вблизи твёрдых поверхностей турбулентность становится анизотропной, а размер турбулентных вихрей уменьшается, явное численное разрешение турбулентных пульсаций требует использования гораздо более мелкой расчётной сетки, чем в условиях развитой турбулентности вдали от стенок. Используют и гибридные подходы, сочетающие свойства моделей двух типов.

Каждая отдельная задача требует использования различных численных методов, имеющих ограниченные области применимости, а также их подстройки под конкретные условия. В общем случае нельзя ожидать, что таким образом удастся воспроизвести реальный спектр пространственных и временных турбулентных структур, поскольку уменьшение размеров ячеек сетки и шага по времени не означает реального расширения этого спектра. Появляющиеся в решении при измельчении сетки всё более высокочастотные компоненты определяются размерами ячейки сетки и могут отличаться от реальных структур в области высоких частот и малых длин волн.

При моделировании физических полей океана необходимо учитывать их многомасштабный (по пространству и времени) характер и многофакторность влияющих условий. Существующие модели не позволяют в полном объёме и количественно строго описать совокупность наблюдаемых явлений. При описании морской турбулентности наиболее продуктивным является метод крупных вихрей (LES). Этот метод позволил описать эффекты нестационарности обтекания равномерно движущегося подводного объекта [5]. В работе [6] для описания обтекания полусферы потоком стратифицированной жидкости предложен гибридный

метод, сочетающий осреднение по Рейнольдсу (RANS) и моделирование крупных вихрей. В пограничном слое реализуется метод RANS. В отрывной зоне при обтекании полусферы реализуется LES. При реализации указанных методов оказалось необходимым введение специальных функций внутри и вне пограничного слоя, которые связывают отдельные решения с учётом размера ячеек. При этом удаётся добиться удовлетворительного соответствия экспериментальным данным путём введения эмпирических констант, что подтверждает вышеуказанные выводы. Вместе с тем гибридный метод косвенно учитывает нелокальность в структурированном турбулентном течении.

**Моделирование турбулентных течений и неравновесная термодинамика.** В рамках современных представлений статистической теории понятие турбулентности связано с наличием статистических связей (корреляций) в различных пространственно-временных точках. Поэтому для адекватного моделирования турбулентных процессов необходимо обратиться к строгим результатам, полученным из первых принципов. В неравновесной статистической механике было доказано, что любой конечный набор усреднённых величин, характеризующих неравновесное состояние макроскопической системы, является неполным, вследствие чего макроскопические уравнения переноса не локализуются в пространстве и времени [7]. Д. Н. Зубарев на основе разработанного им метода неравновесного статистического оператора получил интегральные по пространству и времени термодинамические соотношения между сопряжёнными потоками и макроскопическими градиентами. Содержащиеся в них интегральные ядра обобщают коэффициенты переноса на неравновесные условия и представляют собой пространственно-временные корреляционные функции, которые являются нелинейными функционалами градиентов макроскопических плотностей. Явный вид этих функционалов не получен даже в простейшем случае однородной и изотропной турбулентности. Это обстоятельство несколько десятилетий препятствовало использованию нелокальных моделей в практических задачах.

Поэтому возникла необходимость создания такого подхода к моделированию пространственно-временных корреляций, который способен описать их формирование и динамику в результате внешнего воздействия на систему. Поскольку ни в статистической механике, ни на макроскопическом уровне замкнутое описание получить невозможно, требуется перейти на описание неравновесных процессов на некотором промежуточном мезоскопическом уровне между макро и микро, где также не обойтись без некоторых дополнительных упрощающих предположений.

**Нелокально-гидродинамический подход к описанию высокоскоростных и быстропотекающих процессов.** Полученные Зубаревым нелокальные уравнения переноса послужили основой для разработки нового подхода к описанию реальных неравновесных процессов посредством моделирования динамики пространственно-временных корреляций, которые и описывают развитие турбулентных структур в результате внешнего воздействия на систему [8, 9].

В рамках нелокального подхода было показано, что система в ответ на интенсивное внешнее воздействие трансформирует свою внутреннюю структуру и тем самым уменьшает свои необратимые потери. Выявление связи между первыми моментами пространственных корреляционных функций и характерными размерами внутренней структуры системы позволило описывать переходные процессы с самоорганизацией динамических структур. Граничные условия, наложенные на систему, приводят к дискретизации спектра масштабов структуры системы, как это имеет место в квантовой механике. Релаксация тех степеней свободы, которые не поддерживаются граничными условиями, приводит к эволюции всей системы. Для описания временной эволюции системы вдали от равновесия применяются кибернетические методы управления адаптивными системами через обратную связь [10]. Постановка краевых задач для нелокальных в пространстве и времени уравнений за счёт обратных связей между эволюцией структуры системы и ее макроскопическим поведением становится самосогласованной. Только такой междисциплинарный подход на стыке механики, физики и кибернетики позволяет строить гибкие математические модели процессов вдали от локального термодинамического равновесия.

Можно показать, что в отличие от всех ранее разработанных моделей все особенности турбулентных движений непосредственно следуют из предложенного модельного описания динамики корреляций в нелокальных уравнениях переноса.

**Нелокальная математическая модель турбулентного течения жидкости.** Рассмотрим наиболее простой случай квазистационарного высокоскоростного течения жидкости. Уравнения неразрывности и движения имеют вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0, \quad \frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + \mathbf{J}) = \rho \mathbf{F}. \quad (1)$$

Здесь  $\rho, \mathbf{v}$  — массовые плотность и скорость;  $\mathbf{J}$  — тензор напряжений;  $\rho \mathbf{F}$  — плотность объемных сил. Замыкающее соотношение между тензорами напряжения и градиента скорости пространственно нелокально и зависит от параметров динамической структуры  $\lambda_1(t), \dots, \lambda_n(t)$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \int_V d\mathbf{r}' K(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \lambda_1(t), \dots, \lambda_n(t)) \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}'}(\mathbf{r}'). \quad (2)$$

$K(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \lambda_1(t), \dots, \lambda_n(t))$  — модельная неравновесная корреляционная функция распределения пространственных корреляций, которая является функционалом полей гидродинамических плотностей.

Для определения эволюции параметров используем граничные условия, наложенные на систему и записанные в форме функционалов

$$\Phi_k(\mathbf{v}, \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{r}}, \lambda_1(t), \dots, \lambda_n(t))|_{\mathbf{r}=\Gamma} = 0, \quad k = 1, \dots, p < n. \quad (3)$$

Поскольку этих условий меньше, чем параметров, и они не могут поддерживать стационарное состояние системы, структура течения будет эволюционировать таким образом, чтобы состояние системы стремилось наискорейшим путем стабилизироваться при данных условиях.

Если бы число наложенных условий совпадало с числом параметров модели, состояние системы было бы стационарным. В этом случае уравнения (1)-(3) сводятся к специальному типу нелинейных операторных систем

$$u = F(u, \lambda), \quad \Phi_j(u, \lambda) = 0, \quad j = 1, \dots, n.$$

Здесь  $u \in E, \lambda \in R^n, F: E \times R^n \rightarrow E$ ;  $F$  — нелинейный оператор;  $\Phi_j$  — нелинейные функционалы:  $\Phi_j: E \times R^n \rightarrow R^n$ ;  $E$  — бесконечномерное Банахово пространство. Методы решения таких систем разработаны [10].

Однако нам известно, что вдали от термодинамического равновесия любые состояния системы неустойчивы. Это значит, что неравновесная система всегда будет стремиться к устойчивому состоянию, но не перестанет эволюционировать. Цель эволюции — достижение состояния с максимальным значением полной энтропии при наложенных ограничениях на систему. Такая целевая функция обеспечивает стремление системы к минимизации функционала скорости полного производства энтропии в системе (интегрального производства энтропии)

$$\frac{d}{dt} \Delta S(\lambda_1(t), \dots, \lambda_n(t)) = \sum_{k=1}^n \frac{\partial}{\partial \lambda_k} \int_V d\mathbf{r} \mathbf{J}(\mathbf{r}; \lambda_1(t), \dots, \lambda_n(t)) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{r}}(\mathbf{r}) \frac{d\lambda_k}{dt}. \quad (4)$$

Цель достигается за кратчайшее время, если свободные параметры эволюционируют согласно алгоритму скоростного градиента, разработанному в теории управления адаптивными системами [11]

$$\frac{d\lambda_k}{dt} = -\gamma_k \frac{\partial \Delta S}{\partial \lambda_k}, \quad k = p+1, \dots, n. \quad (5)$$

Система дифференциальных уравнений (5) требует постановки начальных условий для параметров  $\lambda_{p+1}(t), \dots, \lambda_n(t)$ . Согласно алгоритму (5) траектория эволюции системы со временем будет спускаться от начальной точки по гиперповерхности (4), построенной над  $n$ -мерным пространством параметров  $\lambda_1(t), \dots, \lambda_n(t)$ , но не по градиенту, а с учетом связей, наложенных граничными условиями (3).

В результате получаем замкнутую систему нелинейных дифференциально-функциональных уравнений (1)-(5). Эта система с внутренним управлением через обратные связи описывает самосогласованный неравновесный процесс изменения режима течения жидкости вместе с эволюцией ее турбулентной структуры. Полученная модельная формулировка задачи представляет собой новый еще неизученный математический объект, для которого нет готовых методов решения [12].

Подобно математическому аппарату квантовой механики, спектры размеров динамических структур определяются граничными и внешними условиями, налагаемыми на систему. Причем ограниченная система имеет дискретный спектр размеров структуры, а вдали от границ спектр переходит в непрерывный. Определение параметров структуры через внешние условия, накладываемые на систему в виде нелинейных функционалов, является обратной задачей, аналогичной задачам о спектрах в квантовой механике [13]. Применение методов теории управления адаптирует математическую модель к условиям внешнего воздействия, делает ее пригодной для переходных процессов и позволяет выйти далеко за пределы классической механики сплошных сред.

**Нелокальная модель турбулентного течения жидкости в плоском канале.** Рассмотрим стационарное течение вязкой жидкости в бесконечном плоском канале под действием продольного постоянного градиента давления. В ламинарном режиме течения при условиях прилипания на стенках безразмерный профиль скорости параболический

$$dP_{xy} / dy = 1, \quad u = (y^2 - 1) / 2. \quad (6)$$

При высокоскоростном (турбулентном) течении жидкость проявляет неньютоновские свойства, т.е. перепад давления не будет соответствовать увеличению расхода через поперечное сечение. В рамках самосогласованного нелокально-гидродинамического подхода сдвиговое напряжение с модельной корреляционной функцией имеет интегральный вид и зависит от параметров  $\varepsilon, \beta$

$$P_{xy}(y; \varepsilon) = \int_{-1}^1 \frac{dy'}{\varepsilon} \cdot e^{-\frac{\pi}{\varepsilon^2}(y' - y + y \cdot \beta)^2} \frac{du}{dy'}. \quad (7)$$

Уравнение  $dP_{xy} / dy = \chi \neq 1$  с выражением (7) для  $P_{xy}$  и с учетом граничных условий прилипания и симметрии сводится к интегральному уравнению 1-го рода

$$\frac{1}{1 - \beta} \int_{-1}^1 \frac{dy'}{\varepsilon} \cdot e^{-\frac{\pi}{\varepsilon^2}(y' - y + y \cdot \beta)^2} u(y') = \chi \frac{y^2}{2} + C. \quad (8)$$

При  $\varepsilon \rightarrow 0$  интегральное уравнение (8) переходит в дифференциальное уравнение с малым параметром  $\beta$  при старшей производной (кроме границ)

$$(1 + \beta)u(y) - y\beta \frac{du}{dy} = (1 - \alpha) \frac{y^2}{2} + C, \quad \chi = 1 - \alpha. \quad (9)$$

Это значит, что предельный переход к классической гидродинамике возможен везде кроме тонкого пристеночного слоя толщиной  $\beta$ , который не описывается ньютоновской моделью среды. Поэтому требовать выполнения граничных условий прилипания для решения уравнения (9) нельзя. Постоянная  $C$  и параметры  $\alpha \sim \beta \ll 1$  определяются из условий

$$\varphi(0) = F, \quad \int_0^1 \varphi(y) dy = 0, \quad (10)$$

которые обеспечивают изменение профиля скорости при сохранении расхода жидкости по длине канала. Ищем приближенное решение в виде  $u = u_0 + \varphi$ , где  $u_0$  — параболический профиль скорости (6), тогда как  $\varphi$  определяет отклонение профиля от параболического. Для регулярной поправки  $\varphi$  1-го порядка малости получаем

$$\varphi = [(\beta - \alpha)y^2 + \beta] / 2. \quad (11)$$

Из условий (10) находим параметры нелокальной модели  $\alpha = 8F$ ,  $\beta = 2F$  и получаем

$$\varphi(y) = F(1 - 3y^2). \quad (12)$$

При этом градиент скорости в потоке уменьшается  $du/dy = (1 - 6F)y$ , а вязкое напряжение отличается от градиента скорости  $P_{xy} = (1 - 8F)y$ . За счет поправок, которые отвечают за самоорганизацию турбулентных структур, интегральное производство энтропии в сечении канала уменьшается  $\Delta S = \int_0^1 (1 - 6F)(1 - 8F)y^2 dy \approx (1 - 14F)/3$ . При  $F = 0$  профиль параболический, а течение ламинарное. При  $F = 1/6$  профиль плоский, кроме тонких пристеночных слоев. Между этими предельными случаями профили со скачками на стенках остаются параболическими, но значительно более уплощенными по сравнению с классическим профилем. Такие профили приближенно описывают турбулентные режимы течения, представленные на рис. 1.

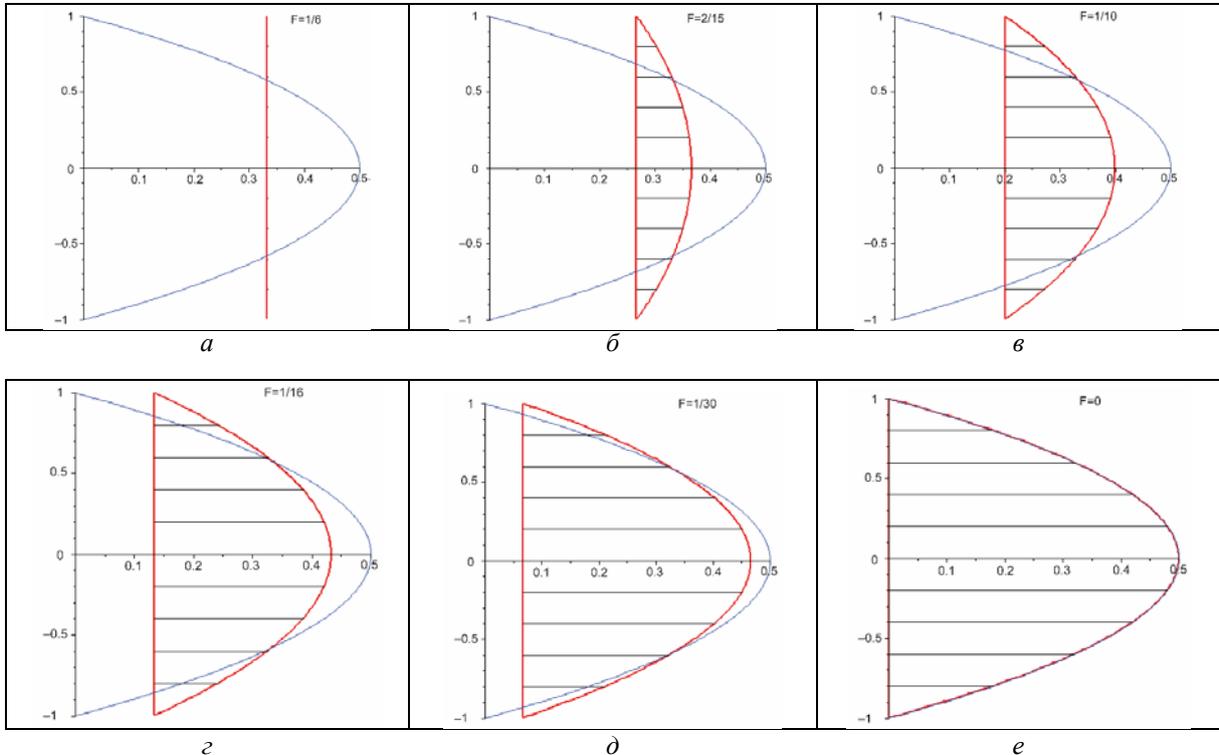


Рис. 1. Эволюция профиля скорости при уменьшении параметра  $F$  в уравнении (12).

$a$  —  $F = 1/6$ ;  $b$  —  $F = 2/15$ ;  $c$  —  $F = 1/10$ ;  $d$  —  $F = 1/16$ ;  $e$  —  $F = 1/30$ ;  $e$  —  $F = 0$ .

По оси ординат — расстояние между пластинами (усл. ед.); по оси абсцисс — скорость (усл. ед.).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Если параметр  $F > 1/6$ , то профили скорости становятся немонотонными, вблизи стенок скорость возрастает, а в центральной части уменьшается, интересно отметить, что такие профили скорости могут возникать в течениях многофазных сред за счет взаимодействия с твердыми границами.

**Литература**

1. Климонтович Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса. М.: Наука, 1990.
2. Климонтович Ю. Л. Энтропия и информация в открытых системах // Успехи физ. Наук. 1999. Т. 169, № 4. С. 443–452.
3. Yonghua Yan Ping Lu. Physics of turbulence generation and sustenance in a boundary layer // Computers & Fluids. 2014. Vol. 102, № 10. P. 353–384.
4. Kuzemsky A. L. Temporal evolution, directionality if time and irreversibility // Rivista del Nuovo Cimento. 2018. Vol. 41, № 10. P. 513–574.
5. Родионов А. А., Ткаченко И. В. и др. Эффекты нестационарности обтекания равномерно движущегося погруженного тела // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, № 4. С. 3–8.
6. Ванкевич Р. Е., Родионов А. А. Численное исследование закономерности генерации субмезомасштабных возмущений при обтекании элементов подводного рельефа // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 4. С. 27–38.
7. Зубарев Д. Н. Неравновесная статистическая термодинамика. М.: Наука, 1971.
8. Хантулева Т. А. Нелокальная теория неравновесных процессов переноса. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2013.
9. Родионов А. А., Хантулева Т. А. Нелокальная гидродинамика и ее приложения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 3. С. 22–36.
10. Вавилов С. А. О разрешимости одного класса операторных уравнений // ДАН СССР. 1991. Т. 316, № 1. С. 22–26.
11. Фрадков А. Л. Кибернетическая физика. СПб.: Наука, 2003.
12. Хантулева Т. А. Об описании неравновесных процессов переноса и формировании динамических структур в жидких средах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 1. С. 3–14.
13. Khantuleva T. A., Kats V. M. Quantum Effects on the Mesoscale // Particles. 2020. Vol. 3. P. 562–575.

## ПРОГРЕСС В ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МОРСКИХ ВОЛН

*Д. В. Чаликов, д-р физ.-мат. наук*

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

## ADVANCE IN NUMERICAL SIMULATION OF SEA WAVES

*D. V. Chalikov, Dr.Sc.*

Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

*Кратко рассмотрены основные подходы к прямому моделированию поверхностных волн, основанные на полных потенциальных уравнениях динамики жидкости со свободной поверхностью. Большинство таких моделей предназначены для изучения прикладных и инженерных задач. Рассмотрена приближенная схема, основанная на двумерных уравнениях. Схема позволяет воспроизводить статистический режим волн с высокой точностью, согласующейся с аналогичными результатами, полученными с точной трехмерной моделью, но счёт идёт примерно на два порядка быстрее.*

*The main approaches in direct modeling of surface waves based on complete equations of dynamics of the inviscid liquid with a free surface are briefly considered. Most of the models are intended for study of the applied and engineering problems. An approximate scheme based on the two-dimensional equations is considered. The scheme allows reproducing the statistical mode of waves with high accuracy consistent with the similar results obtained from the accurate three-dimensional model, while calculations are two orders faster.*

**Введение.** До конца XX в. основные свойства волн изучались главным образом аналитически или численно, но основе упрощенных уравнений. Прогресс в развитии вычислительной техники позволил в конце 1980-х гг. перейти к детальному численному моделированию волн. К началу XXI в. были созданы двумерные и трёхмерные модели, основанные на полных уравнениях потенциального движения жидкости со свободной поверхностью. Модели позволили подтвердить большинство фактов, исследованных экспериментально и аналитически.

Наиболее популярный метод моделирования поверхностных волн основан на спектральном представлении волнового поля. Эта технология была разработана специально для прогнозирования волн. В настоящее время этот подход является единственно возможным методом, позволяющим описать эволюцию волнового поля на больших площадях в течение длительных периодов времени. Несмотря на широкий диапазон применимости, спектральное моделирование нельзя отнести к численному моделированию, поскольку оно основано на предположении о линейности. На самом деле спектральное описание не содержит никакой информации о волнах, а только о распределении энергии волны по направлению и частоте в каждой точке области. Например, эти данные не могут быть использованы для расчета вероятности высоты волны. Спектральная модель предполагает, что волновое поле состоит из суперпозиции линейных волн со случайными фазами. Будучи преобразованным в физическое волновое поле, окажется, что таковое выглядит нереальным, потому что реальные волны обычно имеют протяженные плавные подошвы и острые пики.

Альтернативный подход основан на уравнениях, которые способны воспроизводить свойства реальных волн. Такой подход иногда называют фазо-разрешающим или прямым моделированием, которое определяется как математическое моделирование поверхностных волн, включающее явное моделирование высоты поверхности и эволюции поля орбитальных скоростей. По сравнению с моделированием спектральных волн, моделирование с фазовым разрешением является более общим, поскольку оно воспроизводит реальный видимый физический процесс и основано на хорошо сформулированных полных уравнениях. Модели с фазовым разрешением обычно работают с большим числом степеней свободы. Прямой метод является более сложным, чем спектральный метод, и требует больших вычислительных ресурсов.

Наиболее популярный подход основан на нелинейном уравнении Шредингера разных порядков, полученном разложением возмущений поверхности. Основное преимущество упрощенного подхода заключается в том, что он позволяет свести трехмерную (трехмерную) задачу к двумерной (или двумерную задачу к одномерной задаче). Однако не всегда ясно, какие

из реалистичных эффектов устраняются после упрощений. Например, в уравнениях Шредингера отсутствует неустойчивость высоких волн; следовательно, амплитуды моделируемых волн могут быть нереально большими. В действительности чрезмерный рост волн предотвращается при разрушении волн. Наиболее общий подход, разрабатываемый в последние годы, основан на исходных потенциальных двумерных или трехмерных уравнениях.

Все задачи, основанные на этих уравнениях, можно разделить на две группы: периодические и непериодические задачи. Допущение периодичности значительно упрощает построение численных моделей, хотя такая формулировка может быть применена к случаям, когда условие периодичности приемлемо, например, когда область рассматривается как небольшая часть большой однородной области. Для ограниченных областей без периодичности проблема усложняется, поскольку представление Фурье не может быть использовано буквально.

С точки зрения физики, моделирования с фазовым разрешением можно разделить на две группы: адиабатическое и не адиабатическое моделирование. Простая адиабатическая модель предполагает, что процесс развивается без притоков и стоков энергии. Не будучи полностью свободной от ограничений, такая формулировка позволяет исследовать волновое движение на основе верных первичных уравнений. Включение эффектов диссипации всегда связано с предположениями, которые обычно противоречат предположению о потенциальности, т.е. новые члены, добавленные к уравнениям, следует считать чисто феноменологическими. Все фазо-разрешающие модели используют методы вычислительной математики и наследуют все их преимущества и недостатки, т.е., с одной стороны, возможность детального описания процессов, с другой стороны, ряд специфических проблем, связанных с вычислительной устойчивостью, пространственным и временным разрешением. Математическое моделирование производит огромные объемы информации, обработка которой может быть более сложной, чем само моделирование.

Фазо-разрешающее моделирование волн требует много компьютерного времени, поскольку обычно используется отслеживающая поверхность система координат, что значительно усложняет уравнения. Наиболее трудоемкой частью модели является эллиптическое уравнение для потенциала скорости, обычно решаемое с помощью итераций. К счастью, для двумерной задачи это препятствие полностью устраняется за счет использования конформных координат, сводящих задачу к системе одномерных уравнений, которая может быть решена с высокой точностью [1]. Для трехмерной задачи точное приведение к двумерной форме, очевидно, невозможно; следовательно, решение трехмерного эллиптического уравнения для потенциала скорости становится существенной частью всей задачи.

Основное внимание в настоящем обзоре уделено подходам, связанным с геофизической гидродинамикой. Рассмотренные ниже модели предназначены для исследования механики поверхностных волн и разработки параметризации физического процесса в волнах, которые могут быть использованы в моделях прогнозирования спектральных волн. Тема обзора ограничена работами, посвященными свободным периодическим волнам и основанными на полном уравнении для потенциальных волн. Результаты, полученные на основе моделей, не являются предметом данной статьи.

**Главные направления.** За последние десятилетия было опубликовано большое количество работ, посвященных численным методам, разработанным для исследования волновых процессов см. обзор в [2]. Наиболее общий метод моделирования движения со свободной поверхностью основан на своего рода лагранжевом подходе, который предполагает прослеживание переменной поверхности в фиксированной сетке. В настоящее время применимость этого метода ограничена моделированием в течение относительно коротких периодов. Однако точность этого метода значительно возрастет, когда станет возможным очень высокое разрешение. Преимущество этого метода заключается в том, что его можно использовать для моделирования трехмерного вихревого движения вязкой жидкости даже для неоднозначной границы раздела. Моделирование нелинейного нестационарного потенциального течения со свободной поверхностью началось с разработки подхода граничных интегральных уравнений Эйлера–Лагранжа для крутых опрокидывающих волн. Этот метод, в принципе, может быть обобщен для трехмерного движения, но он требует значительных вычислительных ресурсов. Движение с однозначной поверхностью легко моделируется с использованием простейших координат, следующих за поверхностью, где высота отсчитывается от поверхности

раздела. Эта система координат не стационарна и не ортогональна, поэтому уравнения движения усложняются. Волны на конечной глубине обычно исследуются путем преобразования объема, занимаемого жидкостью, в прямоугольную область.

**Двумерные волны.** Двумерные волны — это движение, рассматриваемое в плоскости  $(x, z)$  ( $x$  — горизонтальная координата;  $z$  — вертикальная). Фактически, подход, основанный на нестационарном конформном отображении, был сформулирован еще до того, как он был использован для численного моделирования (см. обзор [2]). Однако ни один из авторов не использовал конформное преобразование для моделирования долговременной многомодовой периодической волновой динамики. Такая 2-D модель была завершена в 1992 г., когда было начато систематическое использование нового подхода к различным проблемам. Численная схема, основанная на конформном отображении, а также результаты долгосрочного моделирования были представлены в [3]. Нестационарное конформное отображение для конечной глубины позволяет переписать основные уравнения потенциального потока со свободной поверхностью в системе координат, следующей за поверхностью. Уравнение Лапласа сохраняет свою форму, в то время как границы области течения (т.е. свободная поверхность и, в случае конечной глубины, дно) являются координатными поверхностями в новой системе координат. Соответственно, потенциал скорости во всей области получает стандартное представление, основанное на его разложении Фурье на свободной поверхности. В результате гидродинамическая система уравнений (не упрощенная) представлена двумя простыми эволюционными уравнениями, которые могут быть решены численно простым способом и использованы для теоретических исследований.

Предположение о потенциальности упрощает подход настолько значительно, что численная схема не требует каких-либо конечно-разностных аппроксимаций, поскольку производные могут быть точно вычислены с использованием представлений Фурье, в то время как нелинейности могут быть аппроксимированы на плотной сетке с хорошо оцененной точностью. Если не принимаются специальные меры, расчеты обычно заканчиваются намного раньше из-за сильной неустойчивости гребня, которая вскоре проявляется разделением падающего объема на две фазы. Это явление явно не потенциально. Следовательно, как и во многих областях геофизической гидродинамики, необходимо принять некоторые специальные меры (незаконные с точки зрения теории потенциала) для предотвращения численной неустойчивости, в то же время учитывая физические последствия таких событий.

Конформная модель оказывается идеальным инструментом для исследования многих проблем волновой динамики. Высокая точность модели была доказана сравнением нестационарного решения с точными решениями для гравитационных волн (т.е. волн Стокса), гравитационно-капиллярных волн и капиллярных волн (см. [2]). Наиболее интересной особенностью многомодовых волновых полей было четкое разделение частотно-волновых спектров на правильные криволинейные ветви, при этом большая часть энергии концентрировалась вдоль того, что мы называем «основными ветвями». Конформное моделирование использовалось для исследования многих других проблем волновой динамики: динамика экстремальных волн, статистические свойства одномерных волн, неустойчивость Бенджамина-Фейера, аномальные волны, разрушение волн. Систематическое описание конформного моделирования и полученные результаты приведены в книге [4].

Главным преимуществом конформного моделирования является очень высокая точность и производительность. Даже при использовании многих тысяч Фурье мод длительные прогоны могут выполняться в течение вполне приемлемого времени. Следовательно, во многих случаях, когда двумерность приемлема, вместо очень сложных трехмерных моделей следует использовать конформную модель. Конформная модель может быть использована для моделирования и параметризации локальных физических процессов, такого как приток энергии к волнам от ветра, разрушение волн, т.е. для процессов с относительно короткими временными масштабами. Конформная модель, очевидно, неприменима для моделирования развивающегося волнового поля, поскольку нелинейные взаимодействия в двумерном пространстве неэффективны. Двумерный подход рассматривает сильно идеализированное волновое поле, поскольку даже монохроматические волны при наличии боковых возмущений быстро приобретают двумерную структуру.

**Трёхмерные волны.** За последние десятилетия было опубликовано много работ, посвященных трехмерным численным методам, разработанным для исследования волновых процессов. Трёхмерное моделирование поверхностных волн на основе полных нелинейных уравнений является мощным инструментом для исследования волновых процессов, разработки схем параметризации для фазовых и спектральных моделей и прямого моделирования волновых режимов в малых бассейнах. Этот вид моделирования быстро развивается. Наиболее сложный метод основан на полных трехмерных уравнениях и формулировках поверхностных интегралов [см [1)]. Все модели такого типа расширяют подход, первоначально заданный в двумерной постановке. Модель основана на гамильтоновой формулировке, которая позволяет уменьшить проблему вычисления поверхностных переменных путем введения оператора Дирихле–Неймана, который выражается в терминах его разложения в ряд Тейлора по однородным степеням высоты поверхности. Каждый член в этом ряду Тейлора может быть получен из формулы рекурсии и эффективно вычислен с использованием быстрых преобразований Фурье.

Основное преимущество методов граничных интегральных уравнений (ВИЕМ) заключается в том, что они точны и могут описывать сильно нелинейные волны. Метод решения уравнения Лапласа основан на использовании функции Грина, которая позволяет нам свести трехмерную задачу о волнении воды к двумерной граничной интегральной задаче.

Метод поверхностного интеграла хорошо подходит для моделирования волновых эффектов, связанных с очень большой крутизной. Эти методы могут быть применены как к периодическим, так и к непериодическим потокам. Метод не налагает никаких ограничений на крутизну волн, поэтому его можно использовать даже для моделирования волн, приближающихся к разрушению, когда поверхность приобретает неоднозначную форму. Метод позволяет учитывать рельеф дна и исследовать взаимодействие волн с неподвижными конструкциями или со свободно плавающими конструкциями. Однако метод ВИЕМ довольно сложен и требует много машинного времени. Он использовался в основном для моделирования относительно простых волновых полей. Маловероятно, что этот метод может быть применен к моделированию долгосрочной эволюции крупномасштабного многомодового волнового поля с широким спектром.

В настоящее время наиболее популярным подходом является модель HOS [5] (High Order Scheme), разработанная в [6, 7]. Используют две системы координат: криволинейную систему, связанную с поверхностью и декартову систему для вычисления вертикальной скорости поверхности. Аналитическое решение для потенциала скорости в декартовой системе координат известно. Оно основано на коэффициентах Фурье на фиксированном уровне, в то время как истинными переменными являются коэффициенты Фурье для потенциала на свободной поверхности. Здесь возникает проблема перехода из одной системы координат в другую. Эта проблема решается путем разложения поверхностного потенциала в ряд Тейлора вблизи поверхности. Точность этого метода зависит от оценки экспоненциальной функции с конечным числом членов ряда Тейлора. Для волн малой амплитуды и для узкого волнового спектра такая точность является удовлетворительной. Однако для случая широкого волнового спектра, содержащего множество волновых мод, порядок рядов Тейлора должен быть высоким. Проблема заключается в том, что волны с высокими волновыми числами двигаются на поверхности более крупных волн. Поскольку амплитуды поверхностного потенциала ослабевают экспоненциально, амплитуда небольшой волны при положительной высоте увеличивается и, наоборот, может приближаться к нулю при отрицательных высотах. Ясно, что такая формулировка модели HOS не может воспроизводить высокочастотные волны, что фактически уменьшает нелинейность модели. Вот почему такие модели могут быть интегрированы в течение длительного времени без использования высокочастотного сглаживания. Тем не менее, метод показал свою способность правдоподобно воспроизводить эволюцию волн в крупномасштабной области. Очевидно, что модель HOS может быть использована для многих практических целей.

Другая группа трехмерных моделей использует прямое решение уравнений Лапласа, записанных в криволинейной системе координат. Наиболее эффективный, универсальный подход, основанный на трехмерной конечно-разностной модели, разрабатывается в Техническом университете Дании (модель TUD, см. [8]). Модель предназначена для расчета волновой динамики в бассейне произвольной формы и рельефа, содержащем неподвижные и плавающие тела. Очевидно, что эта модель предназначена для решения различных инженерных задач

проектирования и эксплуатации морской техники. Однако модель настолько универсальна, что может быть применена для моделирования волновых режимов в небольших бассейнах. Параметризация физических процессов в модели TUD еще не была представлена.

Модель [9], разработанная в Институте океанологии РАН совместно с Мельбурнским университетом, не совсем универсальна (поскольку использует условие периодичности), но она снабжена разработанными алгоритмами параметризации физических процессов. Система уравнений включает эволюционные кинематические и динамические условия поверхности и уравнение Лапласа для потенциала скорости. Рассматривается двухпериодическая область бесконечной глубины. Построение точной численной схемы для долгосрочного интегрирования этих уравнений в декартовой системе координат невозможно, поскольку поверхность перемещается между узлами сетки. Вместо этого вводится система криволинейных координат, снабженная поверхностью. Эволюционные уравнения становятся лишь немного сложнее, в то время как уравнение Лапласа превращается в полное эллиптическое уравнение. На каждом временном шаге это уравнение может быть представлено в виде уравнения Пуассона с правой частью, зависящей как от самого решения, так и от метрических коэффициентов. Эта процедура, сформулированная в пространстве Фурье, значительно упрощается предположением о периодичности. Значительное упрощение задачи может быть достигнуто путем разделения потенциала скорости на линейную и нелинейную составляющие. Предполагается, что линейная составляющая удовлетворяет уравнению Лапласа с известным решением. Такая процедура имеет много преимуществ, поскольку нелинейная составляющая в среднем меньше на 1–2 десятичных порядка, чем линейная. Это означает, что для решения приведенного уравнения Пуассона можно использовать меньшее число уровней по вертикали, меньшее число итераций и меньший критерий точности. После реализации схемы ввода энергии и параметризации разрушения волн модель была использована для прямого моделирования эволюции двумерного волнового поля под действием ветра, нелинейных взаимодействий и диссипации [2].

**Двухмерная модель трёхмерных волн.** Все трехмерные модели, основанные на полных уравнениях, имеют общее ограничение, то есть низкую вычислительную эффективность. Работа с такими моделями, даже со скромным разрешением, превращается в бесконечное ожидание результатов. Это свойство моделей замедляет их совершенствование, в частности, разработку схем параметризации физических процессов, поскольку такая работа требует многократного повторения прогонов. Такие схемы существенно зависят от разрешения модели, что ограничивает возможность исследования с использованием моделей с низким разрешением.

Недавно в работах [10, 11] была предпринята попытка разработать новый подход к моделированию двумерных периодических волновых полей с разрешением по фазе. Основная идея схемы вытекает из представления потенциала скорости как суммы линейных и нелинейных составляющих, предложенной в [9]. Решение для линейной составляющей известно; следовательно, нелинейная составляющая должна быть вычислена с помощью уравнения Пуассона с нулевым граничным условием на поверхности. Такой подход предлагает новый способ упростить вычисления, рассматривая двумерное уравнение Пуассона на поверхности. Уравнение, которое можно рассматривать как дополнительные поверхностные условия, содержит как первую, так и вторую вертикальные производные потенциала. Таким образом, система уравнений остается незамкнутой. Эмпирическим путем было обнаружено, что эти переменные тесно связаны друг с другом. Линейная зависимость между производными была проверена в [10]. Показано, что использование таких гипотез приводит к формулировке замкнутой системы уравнений, что позволяет получить результаты, близкие к полученным с помощью исходной волновой модели. Замыкание было исследовано и параметризовано на основе точного FWM. Это позволяет исключить вертикальную производную от вертикальной скорости и преобразовать всю трехмерную формулировку в 2-D (поверхностную) формулировку.

*Литература*

1. Chalikov D., Sheinin D. Direct Modeling of One-dimensional Nonlinear Potential Waves. *Nonlinear Ocean Waves* / Ed. W. Perrie // *Advances in Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 17. P. 207–258,
2. Chalikov D. High-Resolution Numerical Simulation of Surface Wave Development under the Action of Wind // *Ocean Wave Studies*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.92262.
3. Chalikov D., Sheinin D. Direct Modeling of One-dimensional Nonlinear Potential Waves. *Nonlinear Ocean Waves* / Ed. W. Perrie // *Advances in Fluid Mechanics*, Vol. 17, 207- 258, 1998
4. Chalikov D. Numerical modeling of sea waves // Springer. 2016. ISBN 978-3-319-32914-7 ISBN 978-3-319-32916-1 (eBook). DOI 10.1007/978-3-319-32916-1. 330 p.
5. Ducrozet G., Bonnefoy F., Le Touzé D., Ferrant P. 3-D HOS simulations of extreme waves in open seas // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 7. P. 109-122,
6. Dommermuth D., Yue D. A high-order spectral method for the study of nonlinear gravity Waves // *J. Fluid Mech.* 1987. Vol. 184. P. 267–288.
7. West B., Brueckner K., Janda R., Milder M., Milton R. A new numerical method for surface hydrodynamics // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92. P. 11803–11824.
8. Engsig-Karup A. P., Harry B., Bingham H. B., Lindberg O. An efficient flexible-order model for 3D nonlinear water waves // *J. Comput. Physics*. 2009. Vol. 228(6). P. 2100-2118.
9. Chalikov D., Babanin A. V., Sanina E. Numerical Modeling of Three-Dimensional Fully Nonlinear Potential Periodic Waves // *Ocean Dynamics*. 2014. Vol. 64, № 10. P. 1469-1486.
10. Chalikov, D. Accelerated reproduction of 2-D periodic waves // *Ocean. Dyn.* 2021, Vol. 71, 309–322. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01435-8>.
11. Chalikov, D. A 2D Model for 3D Periodic Deep-Water Waves // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, Vol. 10. 410 p. <https://doi.org/10.3390/jmse10030410>.

Работа выполнена в рамках государственного задания FMWE-2021-0014.

## НАВОДНЕНИЯ НЕВЫ КАК КОМПЛЕКСНАЯ НАУЧНАЯ ПРОБЛЕМА

Т. И. Малова<sup>1</sup>, канд. геогр. наук, А. А. Родионов<sup>1,2</sup>, чл.-корр. РАН

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

## NEVA FLOODS AS A COMPLEX SCIENTIFIC PROBLEM

T. I. Malova<sup>1</sup>, Ph.D., A. A. Rodionov<sup>1,2</sup>, corresponding member of RAS

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg Research Center of RAS, St. Petersburg, Russia

*Изучение исторических наводнений Невы, в том числе до и после постройки Комплекса защитных сооружений, вековое закрепление нулей отсчета высот и глубин и прогноз изменения уровней акваторий — комплексная научная проблема, решение которой представляет практический интерес не только для Санкт-Петербурга, но и для всего арктического побережья. Одним из вариантов решения было создание глубинных скважинных реперных постов (ГСРП) или систем (ГСРС) в пределах Ленинградского (Санкт-Петербургского) геодинамического полигона. Каждая из трех ГСРС включает четыре репера: один заложен на глубину грунтовых вод, два — над водоносными горизонтами, один — в кристаллический фундамент. Модернизация ранее отработанного эстонского проекта позволила довести точность наблюдений на ГСРС до уровня точности нивелирования I класса. Эффективность ГСРС была подтверждена в ходе откачки вод гдовского горизонта в Шепелево, что позволило выявить нестабильность типовых фундаментальных реперов I класса. Методические решения, отработанные на геодинамическом полигоне, должны быть внедрены в Арктике.*

*The study of the historical floods of the Neva, including before and after the construction of the Complex of protective structures, the secular fixing of the zeros of the height and depth readings and the forecast of changes in the levels of the water areas is a complex scientific problem, the solution of which is of practical interest not only for St. Petersburg, but for the entire Arctic coast. One of the solution options was the creation of deep borehole reference posts (GSRP) or systems (GSRS) within the Leningrad (St. Petersburg) geodynamic polygon. Each of three GSRS includes four benchmarks: one is laid at the depth of groundwater, two are above aquifers, and one is in the crystalline foundation. The modernization of the Estonian project allowed to bring the accuracy of observations on the GSRS to the level of accuracy of leveling I class. The efficiency of the GSRS was confirmed during the pumping of the waters of the Gdov horizon in Shepelevo, which allowed to reveal the instability of typical class I fundamental benchmarks. The methodological solutions worked out at the geodynamic test site should be implemented in the Arctic.*

Проблема наводнений в Финском заливе и в устье Невы волновала жителей прибрежных районов с момента их заселения. Первые попытки поставить решение проблемы на научно-практическую основу были предприняты Петром I и его сподвижниками. Были устроены футштоки для измерения уровней наводнений и каналы для борьбы с ними. Вместе с тем в течение почти 300 лет наводнения были стихийным бедствием для Санкт-Петербурга, Петрограда, Ленинграда. И лишь создание Комплекса защитных сооружений (КЗС) позволило существенно снизить нагрузку затоплений на город.

При создании КЗС обострились проблемы, которые требовали решения. Это:

– продолжение ряда наблюдений на Кронштадтском футштоке, зафиксированных в научно-исторических данных с 1777 г.;

– вековое закрепление нулей отсчета глубин и высот с учетом антропогенного влияния на измерения на Кронштадтском футштоке;

– уточнение гидролого-метеорологических моделей расчета наводнений.

Указанные проблемы, не решенные до настоящего времени, определяют комплексный характер исследований по данному направлению.

Природные процессы, происходящие на вековых интервалах, необходимо изучать комплексно, на фундаментальной обсерваторской основе. Данное утверждение, вне всякого сомнения, относится к изучению наводнений Невы, особенно на современном этапе, в условиях сложившегося подхода к клонированию их перечней и отсутствия репрезентативного каталога. Недостатки существующих перечней можно свести к следующим: отсутствие сведений об ординарных уровнях «до» и «после» каждого наводнения; описки, ошибки и путаница с датами описываемых событий; отсутствие параллельных наблюдений при переносах уровнемерных

постов; редуцирование не измеренных и даже не существовавших наводнений к более поздним системам отсчета высот, включая Балтийскую систему; отсутствие фундаментального подхода к проблеме комплексного изучения наводнений Невы.

Рассмотрим несколько подробнее проблему оценки высот наводнений Невы с позиций гидрометрии и нивелирования. Принимая за неподвижную поверхность ординара, мы получаем возможность изучать относительно нее колебания уровня и глубину того или иного водоема. Согласно таким представлениям, во время сильнейших и катастрофических наводнений, на стадии, близкой к максимальному повышению уровня, создаются квазистабильные условия существования горизонтальной водной поверхности в пределах затопленной части Петербурга. О существовании таких условий писали, например, Ф. В. Бауер [1, 2] и В. А. Берг [3]. Однако близость такой поверхности к максимальному подъему уровня не гарантирует их идентичности. Кроме того, мы не знаем о поведении ординарной поверхности в процессе эволюции наводнения и изменения сопутствующего ему атмосферного давления. Непредсказуемость начала наводнений и смещения футштоков обрекают на неопределенность установку интервалов осреднения. Задача существенно усложняется, если речь идет не о единых уровневых наблюдениях, а лишь о выборах максимальных подъемов уровней.

В рамках концепции неизменности ординарных уровней, характерной для XVIII–XX вв., такие вопросы не исследовались в принципе, а сама концепция оставалась общепринятой практически до обобщения нивелирных работ 1932 г. А. И. Мордухаем-Болтовским [4–6]. При этом статус «среднего уровня моря» как стабильной поверхности сохранялся вплоть до эпохи исследований неприливных изменений силы тяжести, спутниковой альтиметрии и определения формы геоида с использованием ИСЗ.

Постепенно накапливавшиеся факты противоречили концепции стабильности ординаров по причинам сложности и недостаточно полной изученности природных и антропогенных процессов. Так же обстояла ситуация и в геодезических исследованиях. Среди таких фактов главными являются, на наш взгляд, реальные изменения природной среды, в которой выполняются геодезические измерения, и «старение» геодезических реперов и инструментальных сетей в результате проявления современных движений земной коры, а также температурных и деформационных процессов в приповерхностном слое.

Решение задач, связанных с точностью фундаментального закрепления нулей отсчета высот (контроль за стабильностью инженерных сооружений, включая АЭС, изучение деформаций земной поверхности, обеспечение безопасности судоходства и др.), требует выполнения работ по восстановлению системы глубинных скважинных реперных постов (ГСРП) в пределах Ленинградского (Санкт-Петербургского) геодинамического полигона и решения вопросов, связанных с их дальнейшим использованием. Это – важное направление, которое в настоящее время развивается в Санкт-Петербургском филиале Института океанологии.

ГСРП были построены в рамках реализации грандиозного проекта, зародившегося в 1981 г., когда выяснилось, что в результате строительства дамбы Кронштадтский футшток (КФ), от которого отсчитывались все высоты и глубины в СССР, окажется внутри акватории, частично отгороженной от открытого моря. Из этого следовала необходимость его переноса, сохранения и продолжения уровневом ряда наблюдений, а также фундаментального закрепления нуль-пунктов самого футштока и его дублера.

В результате были сооружены Шепелевский дублер КФ (рис. 1) и три ГСРП: в Кронштадте, Ломоносове и Шепелеве. Идея строительства была поддержана всеми ведущими организациями Академии наук, Главного управления геодезии и картографии, Гидрометеослужбы, а также лично Президентом АН СССР А. П. Александровым. Основная цель строительства — обеспечение долговременной прецизионной сохранности высотных отметок. Кроме того, такие реперы представляют собой надежную основу для изучения собственных тектонических движений земной коры, что очень важно в тектонически нестабильных районах, к которым относится территория Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Таким образом был сформирован Ленинградский (более позднее название — Санкт-Петербургский) геодинамический полигон [7].

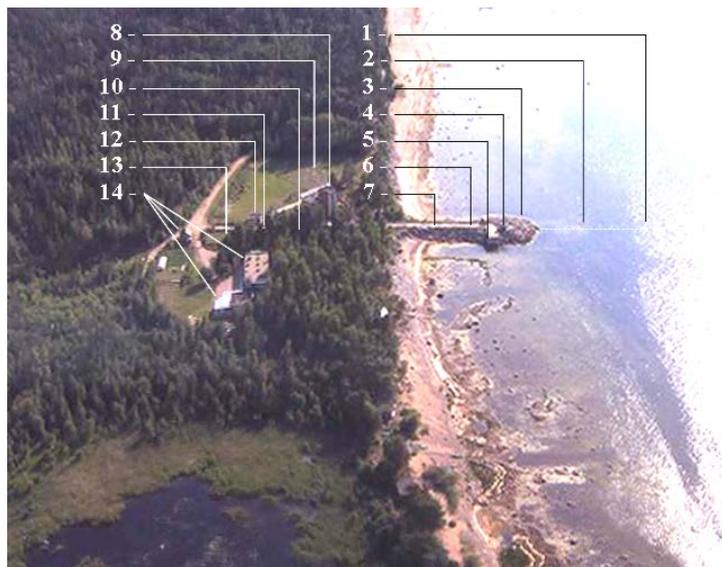


Рис. 1. Шепелевский уровневый и геодинимический комплекс, вид с вертолета.

1 — Приемный колодец мареографа; 2 — соединительные трубы; 3 — защитная часть подходной дамбы; 4 — колодец мареографа (СУМ); 5 — уровневая рейка; 6 — пункт GPS-4 Национальной сети Международного геодезического и геодинимического проекта «Уровень Балтийского моря»; 7 — пункт GPS б/№; 8 — лабораторный и жилой корпус; 9 — метеорологическая площадка; 10 — фундаментальный грунтовый репер 2428 ГУГК Государственной нивелирной сети I класса; 11 — рабочий репер уровневого поста (стенная марка 7271 ГУГК); 12 — глубинный скважинный реперный пост (ГСРП); 13 — куст гидрогеологических наблюдательных скважин на все водоносные горизонты; 14 — соседняя территория частного владения.

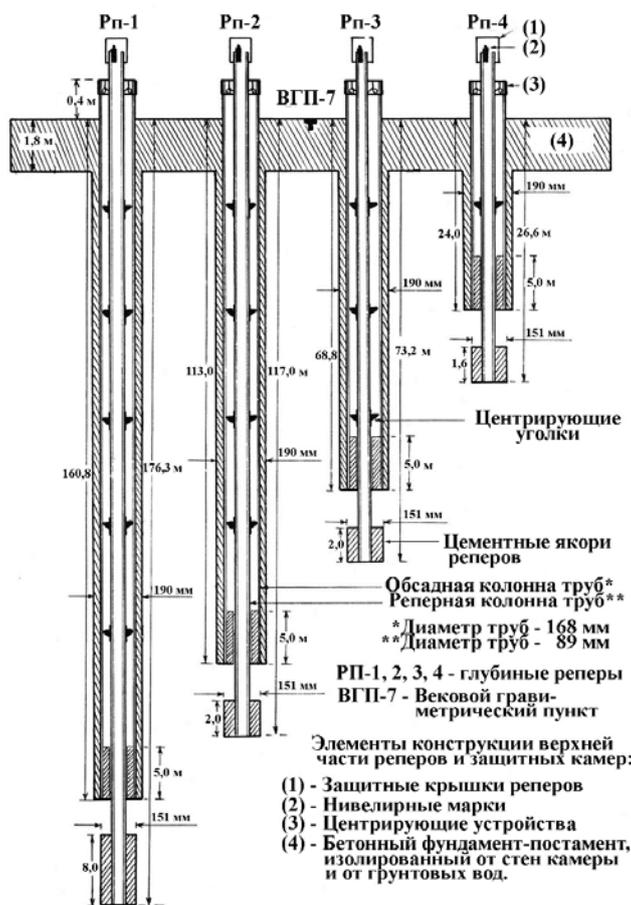


Рис. 2. Конструкция ГСРП (Шепелево).

Прототипом ГСРП послужили аналогичные системы, построенные в Эстонии и хорошо себя зарекомендовавшие. Один из примеров эффективного использования реперных комплексов в Таллине — это установление оседания части города, торгового порта и равномерного поста со скоростью около 1 см в год (68 см за 69 лет) при формальной оценке скорости современного оседания по равномерным материалам в 0,2 мм в год, причем ошибочное значение было отражено на карте современных движений земной коры 1973 г. [8–13]. Результатом исследований стал перенос порта и равномерного поста в другое место.

ГСРП в Кронштадте, Ломоносове и Шепелеве были приспособлены под специфику природных условий Балтийско-Ладожского региона. Каждый пост включает четыре репера, достигающие уровней основных водоносных горизонтов, и один исходный репер, закрепленный в коренных породах специальным «якорем» на глубинах от 160 до 210 м (в зависимости от конкретного поста). Конструкция ГСРП в Шепелево приведена на рис. 2. Каждая реперная труба находится в пределах обсадной трубы. Обе они по своей конструкции являются сборными, с пересекающимися соединительными муфтами. Для стабилизации конструкций внутри обсадных труб использованы центрирующие приспособления. Фундаменты-постаменты с большой инерционной массой позволяют размещать в них гравиметрические пункты и другую прецизионную аппаратуру для изучения изменений гравитационного поля. Нивелирные марки защищены предохранительными крышками и снабжены центрирующими крышками для минимизации отклонений. Точность наблюдений на ГСРП доведена до уровня точности нивелирования I класса.

Однако после ввода ГСРП в эксплуатацию был, к сожалению, выявлен ряд недостатков: не удалось обеспечить термостатирование защитных камер и их надежную гидроизоляцию от грунтовых вод. Кроме того, процесс наблюдений на реперных постах не был автоматизирован, и регистрация смещений реперов относительно самого глубинного в группе производилась методом геометрического нивелирования.

Эффективность ГСРП была подтверждена в процессе опытной откачки артезианских вод на Шепелевском посту: в течение месяца принудительно откачивалась вода из гдовского горизонта, в результате чего было выявлено систематическое уменьшение относительных превышений с глубиной заложения реперов, а также нестабильность фундаментальных реперов I класса, закладываемых на глубины около 1,5–2 м [14]. Таким образом, привязка к этим реперам каких бы то ни было прецизионных объектов и процессов некорректна.

К сожалению, в период Перестройки все работы на ГСРП были остановлены. Посты пришли в нерабочее состояние. На данный момент остро стоит вопрос о возобновлении исследований. В первую очередь, необходимо выполнить экспертное обследование технической исправности всех трех ГСРП.

Если говорить о зарубежных разработках, то наиболее масштабной видится многофункциональная равномерная система NGWLMS (Next Generation Water Level Measurement System, США), разработанная и внедренная в практику во второй половине XX в. в NOAA — National Oceanic and Atmospheric Administration [15]. Целью создания такой системы являлась необходимость замены, устаревшей национальной равномерной сети на новую, предусматривающую улучшение надежности, качества и доступности получаемой информации, а также создание специализированных региональных и части глобальной сетей на основе унифицированного комплексного подхода к получению информации в режиме реального времени. Сеть обеспечивает определение относительных высот уровней, используемых в промерах, картографировании, геологических изысканиях, строительстве береговых сооружений, определении уровня воды, прогнозировании приливов, а также при построении долговременных равномерных трендов и решении большого числа научных задач в области климатологии, геодинамики, геофизики и др. [14].

Станция NGWLMS включает в себя измерительный комплекс, в который входят акустический датчик, датчик давления и традиционная равномерная рейка. Одновременно станция может поддерживать более 11 дополнительных вспомогательных сенсоров. Основное звено, благодаря которому информация передается от сети таких станций для последующей обработки и анализа, — это спутник GOES, связь с которым осуществляется каждые три часа. Станции размещаются на существующих причалах (пирсах) и не имеют подводных труб. В рекламных проспектах и литературе подчеркивается, что NGWLMS может «потеснить» все

предшествовавшие технологии, связанные с накоплением и контролем за информацией, ее передачей, обработкой и анализом данных, распространением информации и управлением работой всей системы [15]. Учитывая это обстоятельство и несомненную эффективность системы, Санкт-Петербургский научный центр РАН пригласил в конце XX в. специалистов NOAA в Санкт-Петербург для обсуждения вопроса о приобретении двух уровнемеров NGWLMS и их установки в Кронштадте и Шепелево. Однако у города не нашлось средств.

Другой заслуживающей внимания системой является глобальная система наблюдений за уровнем моря (GLOSS, ГЛОСС), координируемая Межправительственной океанографической комиссией (МОК) ЮНЕСКО. Она охватывает широкий спектр явлений во времени и пространстве от ветровых колебаний, цунами и т.д. до тектонических и геодинамических процессов [16]. В рамках ГЛОСС важной составной частью являются региональные сети наблюдений за уровнями морей. В частности, в ГЛОСС включены отечественные уровнемерные посты на Балтийском море: Кронштадт, Шепелево, Калининград. Типовой поплавковый мареограф, рекомендуемый GLOSS, предназначен для установки у стенок причалов, молов, пирсов или у обрывистых берегов и не требует подводных труб.

Связь уровнемерных наблюдений с постоянной и временной сетью GPS в свою очередь, может быть также связана с сетью VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Тем не менее, без традиционного нивелирного (наземного) обеспечения уровнемерных наблюдений никак не обойтись. Другое дело, что его применение не должно быть ограничено связями уровнемерных устройств с рабочими и контрольными реперами постов [14].

Отметим, что перспективными проектами для реализации возможностей ГСРП признаны следующие: «Создание в составе морской уровнемерной сети России вековых обсерваторских опорных объектов высшего класса точности по типу Шепелевского дублера Кронштадтского футштока»; «Адаптация глубинных скважинных реперных систем Балтийско-Ладожского региона к робастным системам сейсмозащиты для Арктической зоны».

Задачи обоих проектов во многом сводятся к адаптации существующего проекта ГСРП к природным условиям Арктической зоны. Внедрение ГСРП в этом регионе позволит решить ряд как фундаментальных научных, так и прикладных задач. Прежде всего, появится возможность получать прецизионные сведения о высотах уровня вдоль побережья северных морей. Эти данные необходимы для уточнения навигационных условий вдоль трассы Северного морского пути (в частности, для обеспечения безопасности мореплавания, особенно в мелководных районах), изучения деформационных процессов на территориях крупных инженерных сооружений (определения ресурса их эксплуатации), развития Государственной нивелирной сети I класса в условиях вечной мерзлоты, а также картосоставления (определения нулей для вычисления высот и глубин).

Также будут решены и фундаментальные научные задачи, такие как: изучение динамики развития криосферы, изучение динамики движения географического и магнитного полюсов Земли, прогнозирование сейсмических явлений, изучение долгопериодной динамики приливов в Северном Ледовитом океане.

Практическая и научная значимость вопроса о восстановлении ГСРП и их использовании в условиях Арктики также возрастает в связи с необходимостью ликвидировать отставание отечественных прецизионных высотных (в том числе уровнемерных) измерений от общемирового технического и методологического обеспечения данной отрасли.

*Литература*

1. Бауер Ф. В. Нивеллирование града Санкт-Петербурга сочиненное бывшим господином генерал инженером, генерал квартирмейстером, и разных российских орденов кавалером фон Бауром в 1779-м году. Переведенное по Высочайшему повелению с иностранных языков на российский. в 1795 м году Иваном Липгартом // ГМИ СПб. Фонд графики истории города. Шифр: I-A-549-K. 29 л.
2. Бауер Ф. В. Нивеллирование Санкт-Петербурга, Военно-Топографическое Депо. № 11747. РГВИА (М). Ф. 846. Оп. 16. Д. 22434.
3. Берг В. А. Краткий анализ современного состояния методов прогнозов невыходов и пути их развития // Вопросы морских гидрологических прогнозов / Тр. научно-исследовательских учреждений гидрометслужбы СССР. Сер. V. Гидрометеорология моря. Л.: Гидрометеиздат, 1941. Вып. 1. С. 23–37.
4. Мордухай-Болтовской А. И. Уровни некоторых Ленинградских наводнений XVIII и начала XIX века // Изв. Государственного Гидрологического института. 1932. № 48. С. 14–35.
5. Мордухай-Болтовской А. И. Исследование гидрометрических материалов реки Невы. Часть I / Под ред. Е. И. Иогансона // Мат. по гидрологии, гидрографии и водным силам СССР. Сер. I. Сведения об уровнях воды и гидрометрическая сеть. Л.-М.: Госэнергоиздат, 1932. Вып. XV. 264 с., план.
6. Мордухай-Болтовской А. И. График подъема воды в г. Ленинграде выше 163 см над «0» Витрама при нагонных наводнениях с 1703 г. по 1932 г. с показанием числа наводнений в году // Атлас Ленинградской области и Карельской АССР / Под ред. Ленинградской Плановой Комиссии и Географо-экономического научно-исследовательского института Ленинградского Государственного Университета им. А. С. Бубнова НКП РСФСР. [Л.]: ГЭНИИ, 1934.
7. Богданов В. И., Тетерев А. Г., Ящук С. Д. Отчет о сооружении глубинных скважинных реперных постов в Кронштадте, Ломоносове и в районе мыса Шепелевского. Л.-Таллинн, 1987. 121 с.
8. Состояние равномерных наблюдений и проблема Кронштадтского футштока / Под ред. Ю. Д. Буланже, В. И. Богданов, И. С. Грамберг, Н. Н. Лазаренко. М.: Междуведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР, 1986. 136 с.
9. Ящук С. Д. Пьезометрические депрессии и оседания земной поверхности на территории ЭССР футштока / Под ред. Ю. Д. Буланже, В. И. Богданов, И. С. Грамберг, Н. Н. Лазаренко // Состояние равномерных наблюдений и проблема Кронштадтского. М.: Междуведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР, 1986. С. 96–112.
10. Ящук С. Д. Глубинные реперы для изучения послонных деформаций грунтов и горных пород в Таллинне // Состояние равномерных наблюдений и проблема Кронштадтского футштока / Под ред. Ю. Д. Буланже, В. И. Богданов, И. С. Грамберг, Н. Н. Лазаренко. М.: Междуведомственный геофизический комитет при Президиуме АН СССР, 1986. С. 122–125.
11. Саапар Л. А., Ящук С. Д. Об оседании земной поверхности г. Таллинна // Изучение совр. движений Прибалтики. Тарту: АН ЭССР, 1981. С. 46–52.
12. Арбейтер Р. Я., Валлер Л. К., Саапар Л. А., Савитский Л. А. Оседание земной поверхности в Эстонии под влиянием антропогенных факторов // Вод. ресурсы. 1982. № 2. С. 64–78.
13. Победоносцев С. В. Океанографическое обоснование карты современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы для побережья морей Европейской части СССР // Современные движения земной коры. Тарту: АН ЭССР, 1973. № 5. С. 16–35.
14. Богданов В. И. Кронштадтский футшток и его Шепелевский дублер. Стратегия фундаментального обсерваторского изучения вековых и тысячелетних изменений природной среды в Санкт-Петербургском (Балтийско-Ладожском) регионе. СПб.: «Нестор-История», 2015. 248 с.
15. Next Generation Water Level Measurement System (NGWLMS). Site design, Preparation, and Installation Manual // U.S. Department of Commerce National Oceanic and Atmospheric Administration; National Ocean Service Office of Oceanography and Marine Assessment. Rockville, MD, 1991. 214 p.
16. ГЛОСС (GLOSS). Глобальная система наблюдений за уровнем моря. Буклет // Постоянная служба среднего уровня моря, Проудманская Океанографическая лаборатория; Бидстонская Обсерватория, Биркенхед, Мерсисайд L43 7 RA, Соединенное Королевство; Межправительственная Океанографическая Комиссия ЮНЕСКО 7, пл. Фонтенуа 75700, Париж, Франция.

## ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ НА БАЗЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Я. А. Ивакин, д-р техн. наук, В. И. Ермолаев, канд. воен. наук, А. В. Шатохин, канд. экон. наук  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## SUPPORT OF DECISION-MAKING ON CREATION OF UNDERWATER SURVEILLANCE SYSTEMS BASED ON COMPUTER SIMULATION METHODS

Ya. A. Ivakin, Dr.Sc., V. I. Ermolaev, Ph.D., A. V. Shatokhin, Ph.D.  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Реализация потенциальных возможностей средств и систем освещения подводной обстановки (СОПО) в значительной степени зависит от модельной поддержки должностных лиц на стадиях разработки, изготовления и эксплуатации этих средств и систем. Именно поэтому в исторической ретроспективе развитие средств освещения подводной обстановки и объединение их в комплексы и системы сопровождалось разработкой адекватного инструментария, реализующего различные методы компьютерного моделирования. Анализ опыта совершенствования такого инструментария, представлению роли компьютерного моделирования в современном процессе обоснования решений на построение указанных систем и определению путей развития методов компьютерного моделирования в интересах СОПО посвящена данная статья.*

*Implementation of capabilities of underwater surveillance means and systems (USS) is highly dependent on simulation support of officials on stages of development, production and exploitation of these means and systems. Therefore, in historical terms development of underwater surveillance means and their integration into suites and systems was followed by design of suitable suite of tools implementing different computer simulation methods. This article is devoted to analysis of experience of modernization of such suite of tools, presentation of computer simulation role in modern support of decision-making on creation of such systems as well as shaping development of computer simulation methods for USS.*

**Введение.** Оценка возможностей и выбор параметров функционирования гидроакустических средств, обеспечивающих наилучшие значения показателей их эффективности в конкретных условиях обстановки — основа оптимизации построения и применения систем освещения подводной обстановки (СОПО). Для этого используются способы поддержки принятия решений по выбору параметров функционирования указанных средств: от изготовленных печатным способом атласов гидрологии, справочников, руководств операторов до современных систем поддержки принятия решений операторов и индикаторов тактической обстановки, интегрированных в гидроакустические комплексы. Современный этап развития средств подводного наблюдения, предъявляет качественно новые требования к соответствующим средствам поддержки принятия решений при проектировании и применении СОПО [1, 2]. В свою очередь, компьютерное моделирование процессов, связанных с наблюдением в подводной среде, предусматривает реализацию не только классических методов математического [3–6], логико-инкрементального и пространственного моделирования [7], но и методов геопространственного моделирования, методов интеграции и слияния гетерогенных данных, методов работы с большими данными, методов интеллектуализации [8–10]. С учетом сетцентрического характера построения и применения СОПО, становится возможным определить основные направления развития методов компьютерного моделирования, специфичных для оценки и оптимизации возможностей указанных систем. Анализ основных направлений развития СОПО и методов компьютерного моделирования, как основы средств поддержки принятия решения по построению вышеуказанных систем, а также путей их дальнейшего практического внедрения, позволяет представить перспективу использования этих методов на стадии разработки и эксплуатации СОПО.

**Эволюция методов и средств поддержки принятия решений по построению СОПО.** Возможности средств освещения подводной обстановки в значительной мере зависят от характеристик среды, в которой формируются физические поля, объектов наблюдения. Именно поэтому развитие средств освещения подводной обстановки (ОПО), в исторической

ретроспективе, всегда сопровождалось эволюцией соответствующих средств (методов) поддержки принятия решений по их применению (оценке, выбору оптимальных режимов функционирования в текущих или прогнозируемых гидроакустических, гидрофизических и гидрометеорологических условиях). При этом если предметное содержание указанных средств (методов) поддержки принятия решений поступательно, экстенсивно увеличивалось и совершенствовалось, то формы видоизменялись от таблиц-справочников, климато-океанологических атласов до автоматизированных средств поддержки принятия решений операторов, в состав которых входят разнообразные базы данных по среде, системы гидроакустических расчетов и модели оптимизации, объединенные с геоинформационным интерфейсом. В обобщенном виде это иллюстрируется табл. 1. Форма реализации указанной поддержки определяется базовыми технологиями работы с данными, которые доминируют на том или ином этапе в сфере морского приборостроения. Компьютерное моделирование позволяет добиться наглядного представления зон наблюдения гидроакустических средств, а также оперативно осуществить оценку характеристик таких зон. Пример оценки возможностей СОПО при поддержке принятия решений по ее построению показан на рис. 1.

#### **Компьютерное моделирование при оценке и оптимизации возможностей СОПО.**

Структура современных систем освещения подводной обстановки включает, в общем случае, мобильную (в т.ч. и роботизированные средства) и позиционную составляющие, функционирующие под единым управлением, а также осуществляющих информационное взаимодействие с внешними источниками данных (региональными и глобальными информационными системами). Оптимизация таких систем представляет многоступенчатый и итерационный процесс, охватывающий все этапы их жизненного цикла. На стадии разработки и производства формируется структура СОПО: элементная, пространственная, структура системы управления и информационных связей. Для этого разрабатывается цифровая модель СОПО, с помощью которой производятся модельные исследования системы, оптимизируется ее структура, производится оценка эффективности в различных условиях функционирования. Важным результатом исследования системы с помощью ее цифровой модели является изучение разработчиком ее поведения- реакции на различного рода воздействия. Исследование системы дает возможность сформировать требования к ее подсистемам и элементам. На этом этапе, с учетом системных требований, принимаются проектные решения в отношении разработки и изготовления конкретных средств освещения подводной обстановки. Целью поддержки таких решений является поиск и обоснованный выбор технических схем, конструктива для проектируемых, создаваемых и (или) модернизируемых средств и систем ОПО. Основные методы компьютерного моделирования:

– аналитические методы расчета технических параметров элементов, узлов, блоков, составных частей СОПО, реализованные на практике в виде специализированных пакетов прикладных программ, либо в качестве динамически подгружаемых библиотек для универсальных сред математического (Например, MathCad, Maple или MatLab), логико-инкрементального (Например, ANSYS, SolidWorks, Autodesk Inventor) или имитационного (Например, JPSS, AnyLogic) моделирования;

– методики конструктивного проектирования узлов, агрегатов, приборов из конечных элементов, реализованные как соответствующие элементы той или иной информационной CALS-технологии в соответствующих программных CAD-средах проектирования и разработки (например, SolidWorks или «КОМПАС»), CAE-средах инженерного анализа (например, ABAQUS) или CAM-средах технологической подготовки производства;

– аналитические модели оценки эффективности проектируемых конструктивных решений для приведенных внешних условий, реализуемые как соответствующие программные утилиты для сред разработки. В настоящее время, на стадиях проектирования и изготовления средств освещения подводной обстановки широкое распространение получила концепция «цифровых двойников», создаваемых и исследуемых средств ОПО. Под этим понимается система, состоящая из цифровой модели средства и двухсторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [8–10].

Соответствие поколений в развитии средств ОПО и методов (инструментария) поддержки принятия решений

| Услов. номер поколения средств ОПО | Идентификатор класса средств ОПО  | Обобщенная характеристика возможностей средств ОПО                                                                                                                                                                  | Реализуемые методы (в т.ч. модели, методики) поддержки принятия решений на применение средств ОПО                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Реализуемая форма исполнения инструментария поддержки принятия решений на применение средств ОПО                                                                                 |
|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                  | 2                                 | 3                                                                                                                                                                                                                   | 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 5                                                                                                                                                                                |
| I.                                 | Гидроакустические станции (ГАС)   | Штатные гидроакустические станции на мобильных носителях                                                                                                                                                            | Методики оценки дальности действия (обнаружения целей) в активном и пассивном режимах в зависимости от энергетических возможностей станции, типизированных вариантов распределения скорости звука                                                                                                                                                                                   | Климато-океанографические атласы сезонных типов вариантов распределения скорости звука; Справочники оператора-гидроакустика и формализованные бланки гидроакустических расчетов. |
| II.                                | Гидроакустические комплексы (ГАК) | Гидроакустические комплексы, использующие различные режимы, каналы, антенны различных типов и апертур, а также средства измерения характеристик водной среды в текущей географической точке и по маршруту движения. | Алгоритмизированные методы гидроакустических расчетов, обеспечивающие оптимизацию различных режимов ГАК при поиске, классификации и локализации местоположения цели; алгоритмизированные методики решения прямой и обратной задач гидроакустического обнаружения, поисковых задач. (В том числе, с учетом данных реального значения скорости звука в текущей географической точке.) | Специализированные аппаратно-программные средства-системы гидроакустических расчетов; Индикаторы тактической обстановки. Системы поддержки принятия решений операторов ГАК.      |

Таблица 1 продолжение

| 1    | 2                                                     | 3                                                                                                                                                                                                                                          | 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 5                                                                                                                                                                     |
|------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| III. | Интегрированные системы подводного наблюдения         | Системы, создаваемые на носителях за счет информационной интеграции средств (каналов), функционирующие которых основано на различных физических принципах, вычислительных средств ведения подводной обстановки (БИУС) и других средств ОПО | Методы и модели комплексирования данных от различных бортовых средств освещения обстановки; методы третичной (отождествление) обработки информации, поступающей от различных источников; методы учета пространственной неоднородности водной среды.                                                                              | Интегрированные в состав интегрированных систем программно-информационные средства поддержки принятия решений по оптимизации параметров применения средств ОПО        |
| IV.  | Компоненты интегрированных систем управления кораблем | Подсистема освещения подводной обстановки в составе интегрированных систем боевого управления кораблем.                                                                                                                                    | Методы и модели оптимизации применения средств (каналов) освещения подводной обстановки с учетом складывающейся тактической ситуации. Методы гармонизации, интеграции и слияния данных от гетерогенных источников информации; методы геопространственного представления и привязки данных; методы анализа угроз и оценки рисков. | Интегрированные программно-информационные средства поддержки принятия решений по оптимизации параметров применения средств ОПО в складывающейся тактической ситуации. |
| V.   | Системы освещения подводной обстановки                | СОПО формируемая как средствами самого корабля, так и средствами группировки, включая АНПА, БЭК и пр.                                                                                                                                      | Методы сетцентрической обработки данных ОПО; методы интеллектуализации при интерпретации результатов ОПО; методы компьютерного моделирования области СОПО                                                                                                                                                                        | Специальные программные комплексы с элементами ИИ ВН, интегрированные в состав программного обеспечения ИСБУК, в т.ч. роботизированных средств ОПО.                   |

Примером цифровой модели системы освещения подводной обстановки («цифрового двойника» СОПО) может служить имитационная модель, представленная на рис. 2.

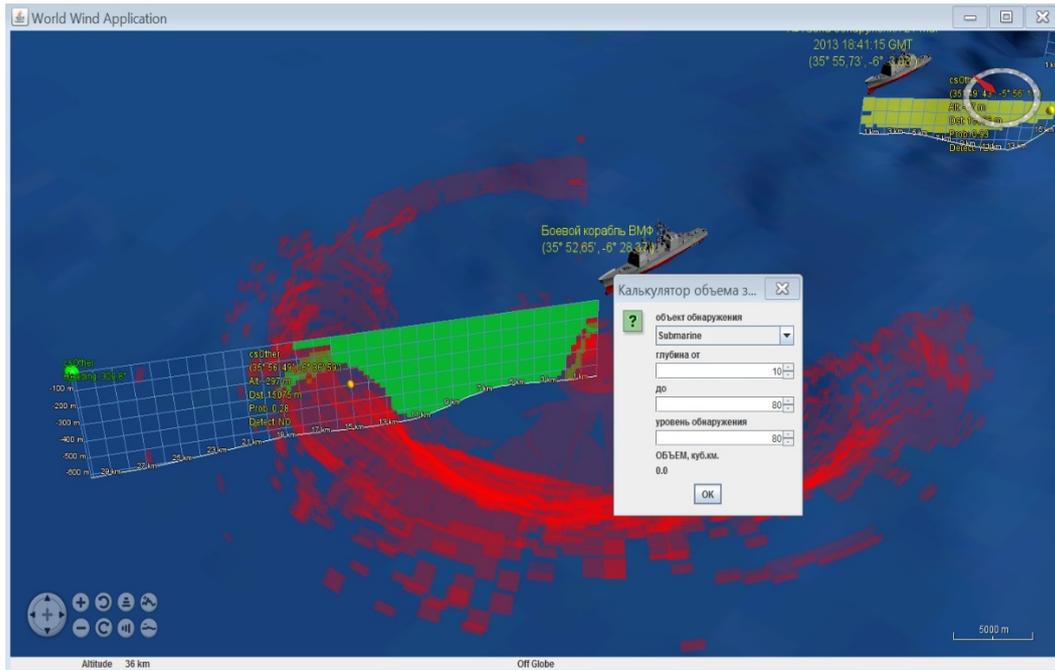


Рис. 1. Пример расчета суммарного объема  $V_0$  или площади сечения  $S_0$  освещаемого подводного пространства.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

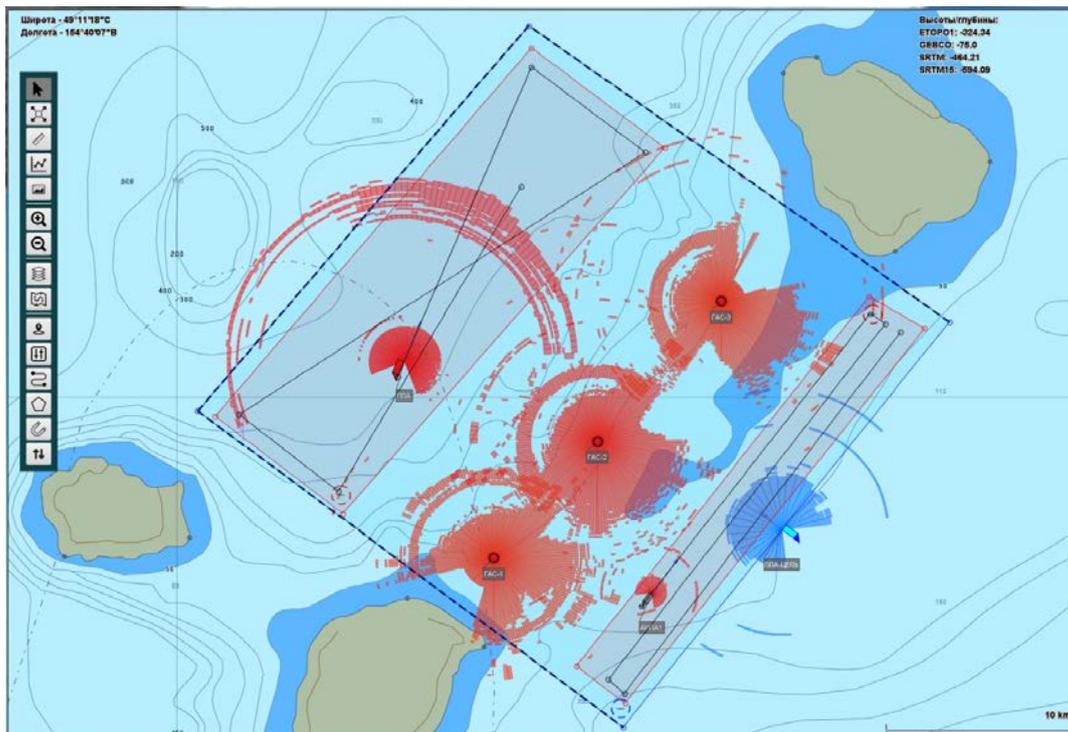
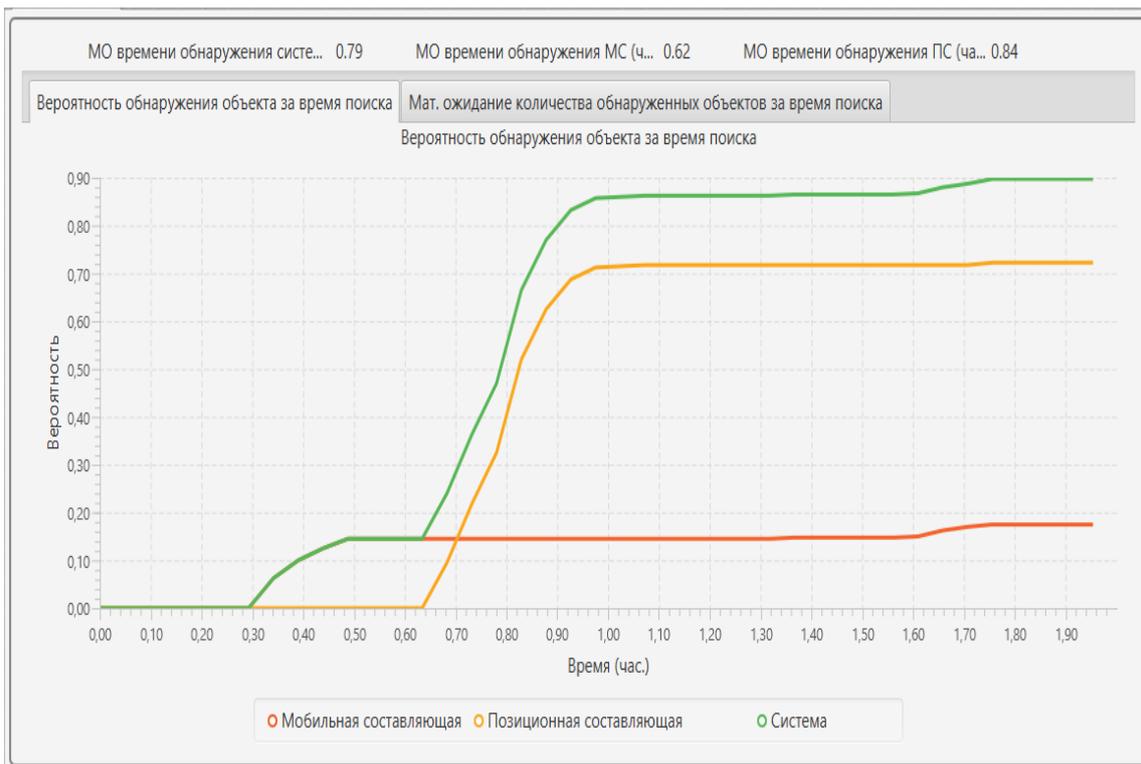


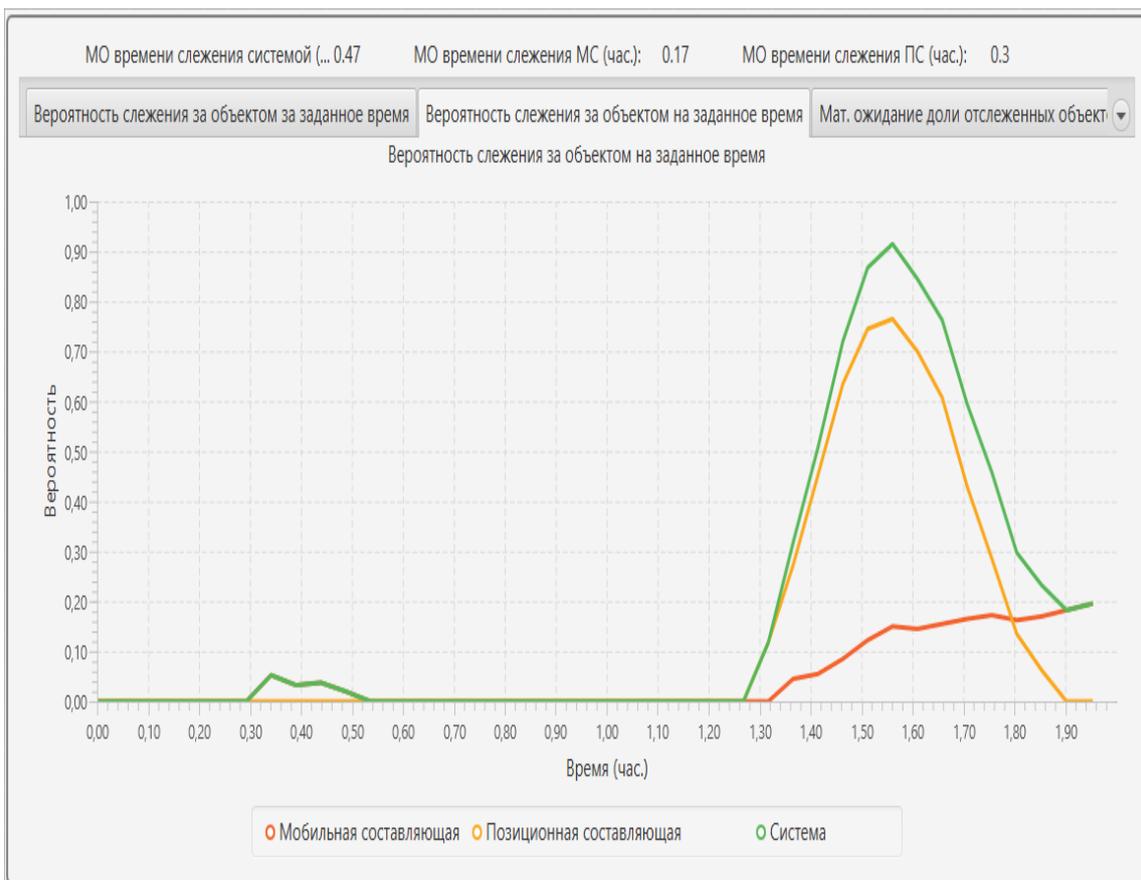
Рис. 2. Цифровая модель системы освещения подводной обстановки.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Пример результатов моделирования исходной обстановки, соответствующей рис. 2, с использованием набора условных данных сил и средств, представлен на рис. 3.



а



б

Рис. 3. Пример результатов моделирования.

а — эффективность поиска; б — эффективность слежения.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Имитационная модель позволяет получить оценки эффективности системы и вклада в эффективность входящих в систему подсистем и средств освещения подводной обстановки по таким показателям как:

- вероятность обнаружения цели за время поиска в районе;
- математическое ожидание времени обнаружения цели;
- математическое ожидание количества обнаруженных целей за время поиска;
- вероятность слежения за целью на заданное время.

Варьируя, в процессе моделирования, составом сил и средств освещения подводной обстановки, методами обследования пространства и режимами работы средств освещения подводной обстановки в различных оперативно важных районах Мирового океана и в различных условиях среды, учитывая существующие временные и ресурсные ограничения, с использованием модели производится количественная оценка перечисленных показателей. Результатом моделирования является оценка соответствия предъявляемым к СОПО требованиям с последующей корректурой (при необходимости) требований ее элементам и подсистемам. На стадии эксплуатации моделирование ориентировано на обеспечение процесса практического применения разработанных средств и систем. На этой стадии компьютерное моделирование приобретает форму системы поддержки принятия решений (СППР) операторов и должностных лиц, управляющих средствами и системами ОПО.

Проблемным вопросом при создании СППР является формирование классов тактических ситуаций (ТС) и разработка методологии выработки рекомендаций по применению средств ОПО с учетом тактики действий сил. Решение данной проблемы заключается не в детализации классов ТС и их адаптации к процессу наблюдения, а в изменении основания классификации ситуаций, требующих выработки рекомендаций. Предлагается при построении СППР использовать понятие не «тактическая ситуация», а «ситуация наблюдения». Термин «ситуация наблюдения» более понятен операторам средств и систем ОПО, так как отражает процесс наблюдения, его отдельные стадии. Кроме того, он инвариантен к понятию «тактическая ситуация», так как в рамках любой тактической ситуации процесс наблюдения остается неизменным, изменяются только объекты наблюдения и задачи наблюдения. СППР должна быть полностью автоматизирована и обеспечивать выработку рекомендаций оператору по всем объектам, находящимся в зоне наблюдения средства или системы с учетом текущей и (или) прогнозируемой ситуации наблюдения. Вывод рекомендаций должен производиться в динамике функционирования средства или системы в масштабе времени близком к реальному. На рис. 4 изображены в графическом виде возможные варианты реализации СППР в рамках одиночного средства ОПО и в рамках системы освещения подводной обстановки.

В 2019 г. сформировано приоритетное технологическое направление «Системы освещения подводной обстановки и судовой акустики». В рамках работ этого направления развивается проект по совершенствованию и специализации методов, средств и информационных технологий компьютерного моделирования в интересах СОПО. Реализация указанного программно-аппаратного комплекса компьютерного моделирования предусматривает его исполнение с учетом реализации изложенных выше особенностей информационной и модельной поддержки должностных лиц на стадиях принятия решения на создание новых средств и систем ОПО.

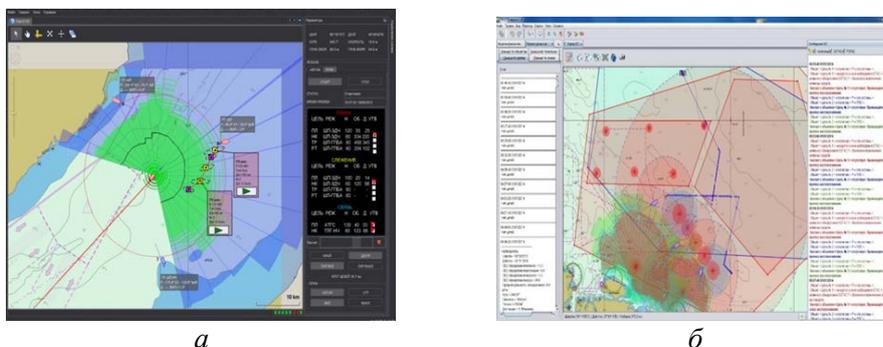


Рис. 4. Возможные варианты реализации СППР операторов средств (а) и систем освещения обстановки (б).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**Заключение.** Развитие методов компьютерного моделирования СОПО по рассмотренным в статье направлениям должно обеспечить новое качество процессов проектирования, оптимизации возможностей и применения по назначению средств и систем освещения подводной обстановки. Это качество создает условия для реализации эффективных средств и систем ОПО в практической (боевой) деятельности флота. Дальнейшее совершенствование описанных направлений и методов компьютерного моделирования предметной области СОПО есть одна из сфер деятельности соответствующего приоритетного технологического направления. Реализация поддержки принятия решений по построению систем освещения подводной обстановки на базе методов компьютерного моделирования является актуальной задачей морского приборостроения. Её решение открывает новые перспективы для совершенствования методов и форм проектирования, создания, применения перспективных средств ОПО.

#### *Литература*

1. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М., Радио и связь, 1985. 238 с., ил.
2. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем. М., Мир, 1978. 254 с., ил.
3. Теория обнаружения и поиска подвижных объектов / Под ред. д-ра техн. наук В. В. Поповича. СПб.: Наука, 2016. 424 с.
4. Потапычев С. Н., Ивакин Я. А. Использование геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений // Вест. СПбГУТиД. «Естественные и технические науки». Серия 1. 2018. № 2. С. 24–32.
5. Величкин С. М., Миронов Д. Д., Антипов В. А., Зеленкова И. Д., Перельмутер Ю. С. Способ получения информации о шумящем в море объекте и способ получения цветовых шкал для него // Патент на изобретение № 2156984 от 27.09.2000 г.
6. Коновалов В. Е. Интегрированная система подводного наблюдения для Арктического региона / Под ред. М. Я. Андреев, С. Н. Охрименко, И. Л. Рубанов, В. Е. Коновалов // Науч. вест. оборонно-промышленного комплекса России. 2017. № 4. С. 71–76.
7. McConnel S. Code Complete: A Practical Handdook of Software Construction. NewYork, Microsoft Press, 2014. 889 p.
8. Ивакин Я. А., Потапычев С. Н. Модель информационно-сопроводительной сети для изделий отечественного гидроакустического вооружения // Гидроакустика. 2019. № 39(3). С. 81–88.
9. Шатохин А. В., Ивакин Я. А., Нештенко В. С. Координирование услуг предприятий морского приборостроения в интересах системы эксплуатации гидроакустического вооружения ВМФ // Морской сборник. 2020. № 11. С. 12–54.
10. Сурманидзе Р. А., Титов К. Б. Оценка возможности использования искусственных нейросетей в задаче классификации морских целей в гидроакустических комплексах // Сб. статей и докладов ВМПИ ВУНЦ ВМФ ВМА. СПб.: Межведомственная НТК, 2020. № 1(25). С. 289–307.

ПАМЯТИ СТАНИСЛАВА АЛЕКСЕЕВИЧА СМИРНОВА – ОРГАНИЗАТОРА  
ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ГИДРОАКУСТИКИ И ГИДРОФИЗИКИ»

*V. A. Popov*, канд. техн. наук, *I. A. Seleznev*, д-р техн. наук  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

IN MEMORY OF STANISLAV ALEKSEEVICH SMIRNOV – ORGANIZER  
OF ALL-RUSSIAN CONFERENCE «ADVANCED TECHNOLOGIES  
OF HYDROACOUSTICS AND HYDROPHYSICS»

*V. A. Popov*, Ph.D., *I. A. Seleznev*, Dr.Sc.  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*10 мая 2022 г. исполнился один год со дня смерти Станислава Алексеевича Смирнова — организатора Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», постоянного председателя её оргкомитета и бессменного руководителя секции «Гидроакустические системы». Вся жизнь и творческая деятельность С. А. Смирнова была посвящена развитию прикладной гидроакустики, созданию и совершенствованию отечественных гидроакустических систем военного и гражданского назначения. Он является основоположником теории и практики проектирования средств освещения ледовой обстановки для подводных лодок.*

*On the 10<sup>th</sup> of May 2022 one year has passed since the death of Stanislav Alekseevich Smirnov — organizer of All-Russian conference «Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics», permanent co-chairman of its Organizing Committee and head of section «Hydroacoustic systems». The whole life and work of S. A. Smirnov was devoted to development of applied hydroacoustics, creation and enhancement of domestic civil and military hydroacoustic systems. He is a founder of theory and practice of development of ice environment surveillance means for submarines.*

Станислав Алексеевич Смирнов родился 1 апреля 1936 г. в г. Улан-Батор Монгольской Народной республики, где в то время работал его отец Смирнов Алексей Миронович, крупный специалист в области ветеринарии, профессор Ленинградского ветеринарного института.

С 1953 по 1959 гг. Станислав Алексеевич учился на электрофизическом факультете Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина), на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники. Это была первая в стране кафедра, начавшая еще с 1931 г. готовить отечественных специалистов-гидроакустиков. Создателем и многолетним заведующим кафедрой был Сергей Яковлевич Соколов, крупнейший ученый в области акустики и ультразвуковой техники, член-корреспондент АН СССР. В 1959 г. Станислав Алексеевич окончил институт, защитив диплом с отличием. Среди его одногруппников было много студентов, ставших впоследствии крупными учеными-акустиками. Достаточно вспомнить Перельмутера Ю. С., одного из пионеров отечественной классификации в гидроакустике, Шевьева Ю. П., доктора технических наук, профессора, многолетнего заведующего кафедрой акустики Ленинградского института кино и телевидения. Учились вместе с ним и многие другие специалисты, отдавшие десятилетия из своей жизни работе в ЦНИИ «Морфизприбор».

С апреля 1959 г. С. А. Смирнов начал трудиться инженером лаборатории на предприятии п/я 746 (НИИ-3), так до 1966 г. назывался ЦНИИ «Морфизприбор» (далее Институт). С сентября 1961 г. он старший инженер, с мая 1962 г. — ведущий инженер, а с августа 1966 г. — начальник этой лаборатории — комплексного проектирования специальной аппаратуры. Причинами такого быстрого роста стали не только сам молодой специалист, обладавший глубокими знаниями в выбранной области, не боявшийся работать руками, понимающий и технику конструирования антенн, и электронику, и методы обработки гидроакустической информации, но и сложившаяся к тому времени ситуация вокруг тематики, в которой эти знания и умения оказались востребованы. В Военно-Морском Флоте появились атомные подводные лодки (АПЛ), способные решать задачи подо льдами Арктики. В составе их гидроакустических средств должна была быть аппаратура, способная из-под воды обнаруживать полыньи и разводья в ледовом покрове и обеспечивать всплытие в них подлодки. На момент прихода Станислава Алексеевича

такая задача ещё не была надлежащим образом поставлена Институту проектными бюро, не говоря уже о формулировке требований в тактико-техническое задание.

Ему пришлось стать первопроходцем. Для этого необходимо было понимать физические свойства льда, научиться проектировать гидроакустическую аппаратуру, способную отличать водную поверхность полыньи от ледового покрова, причем как впереди по курсу, так и по сторонам ПЛ, чтобы обеспечить её безопасное всплытие. Станислав Алексеевич с первых дней работы в Институте включился в выполнение исследований по НИР «Земля». Он взялся за создание уникального по тем временам измерительного прибора — анализатора спектра. В этой работе он самостоятельно предложил ряд конструктивных и схемных решений, самостоятельно произвел полную настройку макета прибора. С января 1961 г. Смирнов — руководитель заказа темы «Панорама», по которой был разработан комплекс измерительной аппаратуры и проведены экспериментальные исследования, давшие ряд новых научных результатов. В этой работе он руководил группой, обеспечивающей решение специальных задач в высоких широтах. С февраля 1962 г. он приказом Госкомитета по радиоэлектронике Совета Министров СССР назначен научным руководителем НИР, что свидетельствовало о высокой значимости работы для страны.

Участвуя в высокоширотных экспедициях в районе о. Диксон (1962 г.) и на дрейфующей станции «Северный полюс-13» (1965 г.), он провел исследования закономерностей отражения и рассеяния звуковых волн ледовой поверхностью и морским дном. На основании результатов этих исследований были сконструированы гидролокаторы для обнаружения разводий. Участник трансарктического перехода АПЛ через Северный полюс со всплытием в районе станции «Северный полюс-15 (1967 г.). Главный конструктор гидроакустической станции «Торос» (НОР-1, 1965–1967 гг.) для АПЛ. Страна высоко оценила достижения молодого талантливого инженера — в 1966 г. он получил орден Трудового Красного Знамени, в 1968 г. — медаль «За трудовую доблесть», а в 1969 г. стал лауреатом Государственной премии СССР в составе коллектива научно-исследовательского института Арктики и Антарктики за пионерские работы по исследованию льдов Арктики. Результаты исследований С. А. Смирнов опубликовал в нескольких серьезных научных работах и отчетах о НИР. К 1967 г. была написана и успешно защищена кандидатская диссертация (диплом кандидата физико-математических наук от 28 июня 1967 г., присужден решением Диссертационного совета ААНИИ от 12.04.1967 г.). В 1970 г. Смирнову было присуждено ученое звание старшего научного сотрудника (решение ВАК СССР от 22.04.1970 г. по специальности «Электроакустика и звукотехника»).

В 1971 г. С. А. Смирнов становится начальником научно-исследовательского отдела (НИО-13). Как руководитель отдела, он участвует в работах по выполнению большого количества важных для предприятия, зачастую пионерских опытно-конструкторских работ (ОКР) — «Лотос», «3403», «Крильон», «Шельф», «Птань», «Онега» и др. Идет работа по сбору материалов для докторской диссертации. В 1975 г. Станислав Алексеевич назначен главным конструктором ОКР «Игарка». В 1976 г. он назначается начальником первого (комплексного) научно — исследовательского отделения численностью около 600 человек. От проектирования «малых» систем, на которых получен весь предыдущий опыт инженера и исследователя, надо было переходить к большим гидроакустическим комплексам (ГАК) для ПЛ, которыми занимается первое комплексное отделение. Как очередной шаг большого пути — назначение в 1979 г. главным конструктором ОКР «Иртыш-Амфора». Это серьезнейший шаг в судьбе Станислава Алексеевича, так как «Иртыш-Амфора» — ГАК для IV поколения АПЛ. ОКР была завершена только в конце 2010-х гг., но это стало большим событием и для предприятия и ВМФ.

Еще одна важная работа, которую вел в этот период времени Смирнов как научный руководитель — НИР «Форма» (1979 г.). Программная работа по построению облика носовой оконечности подводной лодки в интересах размещения там основной гидроакустической антенны ГАК. Результаты этой работы нашли свою реализацию при создании ГАК «Иртыш-Амфор» для подводной лодки проекта «Ясень». В 1986 г. С.А. Смирнову исполнилось 50 лет, и он является авторитетным руководителем. В приказе, подписанном директором Института В. В. Громковским, отмечалось — «...творческий подход к делу, глубокие знания и практический опыт, высокая принципиальность, требовательность, доброжелательное отношение к товарищам по работе являются основой того авторитета и уважения, которым заслуженно пользуется Станислав Алексеевич в коллективе объединения и смежных

предприятий». И это не формальные слова, это объективная и правильная оценка деловых и личностных качеств юбиляра.

В 1988 г. С.А. Смирнов стал заместителем директора Ленинградского научно-производственного объединения (ЛНПО) «Океанприбор» по научной работе — заместителем директора по комплексному проектированию ЦНИИ «Морфизприбор». Такая сложная по наименованию должность была обусловлена созданием в стране в 1970-х годах научно-производственных объединений — особого рода объединений научных и производственных предприятий, во главе которых, как правило, находился научно-исследовательский институт. В ЛНПО «Океанприбор» входило несколько предприятий, преимущественно заводов («Ладога», «Полярная звезда», «Водтрансприбор» и др.), головной организацией ЛНПО являлся ЦНИИ «Морфизприбор». ЛНПО входило в десятку крупнейших предприятий Ленинграда, в нем работало около 15 тысяч человек, а в самом ЦНИИ около 7,5 тысяч. И за научную политику этого гиганта стал отвечать Смирнов, причем на самом важном направлении — в части комплексного проектирования ГАК. В тот период времени заместителей по научной работе было несколько, но наиболее важные задачи оставались за Станиславом Алексеевичем.

С 1998 г. С. А. Смирнов — начальник вновь созданного в ЦНИИ «Морфизприбор» подразделения, объединившего в себе отделение координации и внешнеэкономической деятельности, а также подразделение разработчиков, проводящих предконтрактные проработки для внешнеэкономических контрактов. Вообще же Станислав Алексеевич начал заниматься вопросами внешнеэкономической деятельности еще в начале 1970-х гг. Перечень стран, в которых он побывал в целях ознакомления с зарубежным опытом и с предложениями собственных разработок, вызывает уважение. Это Алжир, Египет, Индия, Бразилия, США, Франция, Германия, Великобритания, Польша, ОАЭ, Ливия, Южная Корея, Индонезия, Малайзия, Сингапур, Вьетнам. Фактически именно он стал основным переговорщиком Института — по квалификации, широте интересов, а в способности за короткий срок самостоятельно принять решение и оформить его в виде протокольного документа, равных ему просто не было. В конце 1990-х был заключен успешный контракт с Алжиром, в рамках которого удалось разработать экспортные варианты ГАК «Платина» для НК, ГАК «Рубикон» для ПЛ, станции «Паллада», предназначенной для противодиверсионной защиты НК. Именно этот контракт стал судьбоносным для предприятия, а созданный в его рамках новый задел, создал внешнеэкономический потенциал, потом давший свой результат при выполнении заданий «Рособоронэкспорта» для Индии и Вьетнама. Что-то из этих проработок оказалось полезным и для основных изделий предприятия, в частности, для модификаций ГАК «Рубикон», ставших базовыми для отечественных неатомных подводных лодок (НАПЛ) начала XX века. С 2015 г. С. А. Смирнов становится помощником генерального директора по внешнеэкономической деятельности.

Позднее у Станислава Алексеевича появились и новые интересы. Он почувствовал необходимость начать делиться своим опытом с подрастающим поколением. И появилась идея проведения постоянно действующего семинара по основным направлениям деятельности предприятия, участниками которого стали и молодые специалисты и ветераны, и не только как докладчики, но и как слушатели. Недостаток информации у молодых разработчиков о нереализованных идеях, технических замыслах и опыте разработок, витающих в умах ветеранов гидроакустики, оказалось возможным восполнить на таких вот семинарах, где обсуждались самые различные вопросы, и центром их был Станислав Алексеевич. Он определял периодичность и тематику семинаров, подбирал докладчиков, ведя эти семинары, умел, где надо, обострить дискуссию, заставить задуматься, подробнее обсудить какое-то конкретное решение.

Еще одним направлением, увлекшим С. А. Смирнова, стала всероссийская научно-техническая конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Он фактически явился основателем этого форума специалистов-гидроакустиков в 1996 г., уже позже, когда к ней присоединились гидрофизики, она стала академическим мероприятием.

Более двух десятилетий Станислав Алексеевич, в качестве сопредседателя, готовил эту конференцию, вел одну из основных секций, вычитывал и правил доклады, сделав эту конференцию наиболее значимым российским форумом по прикладной гидроакустике и гидрофизике. Для проведения конференции выбирались различные значимые площадки — историческое здание Академии наук, дворец Кочубея, Университет, Центральный Военно-

морской музей. Для большинства участников праздником являлась уже сама возможность приехать в Санкт-Петербург и встретиться с коллегами, рассказать о последних достижениях, найти партнеров по выполнению проектов. Конференция под шифром «ГА» навсегда останется для нас связанной с именем С. А. Смирнова, очень серьезно относившегося к ней.

Много внимания уделял Станислав Алексеевич общественно-научной работе. Он являлся вице-президентом Восточно-Европейской ассоциации акустиков, членом бюро Научного совета по проблемам прикладной гидрофизики СПб Научного центра РАН, членом НТС Концерна, экспертом и консультантом по множеству вопросов, имеющих отношение к задачам гидроакустики. За долгую жизнь ему пришлось заниматься очень разной тематикой – от создания гидроакустического вооружения до организации новых конверсионных направлений в работах Концерна, участия в программах РАО «Газпром», создания рыбопоисковой техники, какое-то время он даже являлся куратором этого направления в 10 главке Минсудпрома. «За выдающиеся заслуги в области создания гидроакустических комплексов и в связи с 75-летием со дня рождения» решением Совета директоров ОАО «Концерн «Океанприбор» от 23 марта 2011 г. № 32 С. А. Смирнов был награжден Почетным Знаком «За вклад в прикладную гидроакустику».

С. А. Смирнов написал более 100 научных работ, авторских свидетельств и патентов. Именно энергией и усилиями Станислава Алексеевича появился ряд изданий, очень важных для понимания роли «Океанприбора» в мировой и отечественной гидроакустике. В 2004 г. им, совместно с Г. В. Яковлевым и Ю. А. Корякиным, была написана книга «Корабельная гидроакустическая техника», ставшая учебником для нового поколения студентов кафедры ЭУТ. Фактически, до сего дня это единственная отечественная монография, в которой доступно и понятно изложены задачи гидроакустического вооружения, основные подходы к его проектированию, приведены сравнительные характеристики современных отечественных и зарубежных гидроакустических систем. В 2009 г. при его активнейшем участии вышла монография «Концерн «Океанприбор». Исторический очерк». В 2013 г. было выпущено второе издание, дополненное и исправленное, и в нем Станислав Алексеевич написал две новых главы, отражающие достижения предприятия за последние годы.

В процессе создания этой книги он решил реализовать еще идею написания монографии об отечественном научном флоте, предназначенном для испытаний гидроакустического вооружения. Результатом работы стала книга «Морские испытания гидроакустической техники на опытовых кораблях и судах», написанная им совместно с К. И. Полкановым и вышедшая в издательстве «Наука» в 2013 г. И последним трудом С. А. Смирнова, стала книга воспоминаний «Одиссея молодого специалиста-гидроакустика», созданию которой Станислав Алексеевич посвятил последние годы жизни. К 2020 г. был уже готов отредактированный оригинал-макет, но только в этом году ее удалось запланировать к изданию нашим предприятием в серии книг «Люди и годы».

С. А. Смирнов был человеком, щедро одаренным природой. Блестящее знание предмета, художественный вкус, умение быстро оценить характеристики и ожидаемые результаты, позволяли ему создавать конечный продукт, не требующий дополнительных доработок. Таким он и останется в нашей памяти. Ярким, талантливым, многогранным, способным решать самые сложные задачи и делать это с только ему присущим блеском. Один из последних представителей уходящего поколения выдающихся ученых и инженеров, создававших гидроакустическое вооружение для Военно-Морского Флота во второй половине XX в.

#### *Литература*

1. Александров Г. А., Корякин Ю. А., Полканов К. И., Селезнев И. А., Смирнов С. А. Концерн «Океанприбор». Исторический очерк. 2-е издание, испр. и доп. СПб, Наука, 2013. 240 с.: ил.
2. Полканов К. И., Смирнов С. А. Морские испытания гидроакустической техники на опытовых кораблях и судах // СПб.: Наука, 2013. 92 с., ил.
3. Беркутов Р. Н., Попов В. А., Селезнев И. А. Создание нового поколения гидроакустических средств с использованием первых образцов цифровой вычислительной техники (1966-1975 гг.) // Гидроакустика. 2019. Часть 3. № 39 (3). С. 88–96.

## В. И. КЛЯЧКИН — ОСНОВОПОЛОЖНИК НАУЧНОЙ ШКОЛЫ В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

*I. A. Seleznev*, д-р техн. наук

АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

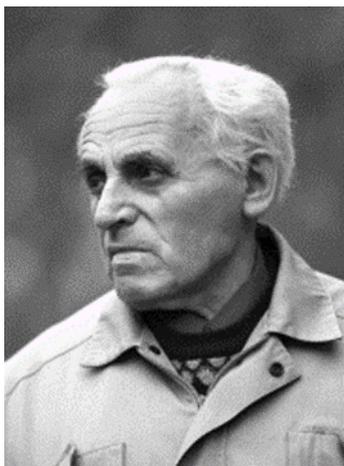
## V. I. KLYACHKIN — A FOUNDER OF SCIENTIFIC SCHOOL OF APPLIED HYDROACOUSTICS

*I. A. Seleznev*, Dr.Sc.

JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Вся жизнь и творческая деятельность Владимира Исааковича Клячкина — ветерана Великой Отечественной войны, выдающегося ученого — гидроакустика была посвящена развитию направления пространственно-временной обработки разнородных гидроакустических полей в прикладной гидроакустике, созданию и совершенствованию отечественных систем подводного наблюдения. Он является основоположником теории и практики проектирования средств освещения обстановки для современных отечественных подводных лодок Военно-Морского флота.*

*The whole life and work of Vladimir Isaakovich Klyachkin — veteran of the Great Patriotic war and outstanding scientist — sonar operator was devoted to development of the direction of spatio-temporal processing of heterogeneous sonar fields in applied hydroacoustics, creation and enhancement of domestic underwater surveillance systems. He is a founder of the theory and practice of development of surveillance means for modern domestic submarines of the Navy.*



Профессор  
В. И. Клячкин  
(1923–2012)

Владимир Исаакович Клячкин родился 20 октября 1923 г. в Петрограде. В 1941 г., сразу после окончания 10 класса, 17-летним подростком В. И. Клячкин добровольцем ушел на фронт, сначала в ополчение, где в окрестностях Пушкина защищал ближайшие подступы к Ленинграду, затем уже в составе кадровых частей воевал на различных фронтах Великой Отечественной. Был бойцом Ленинградского народного ополчения, участником обороны Ленинграда и освободительных боев на пути от Дона и до Румынии, воевал на Ленинградском, Воронежском, Юго-Западном, 2-м и 3-м Украинских фронтах. Война для Владимира Исааковича закончилась в Молдавии в 1944 г., когда после третьего ранения он был направлен во вспомогательную часть, где и служил до конца войны. Демобилизован Владимир Исаакович был в ноябре 1945 г., вернулся в Ленинград, поступил на физико-механический факультет Политехнического института. После окончания с отличием института по специальности «техническая физика» зимой 1951 г. был

направлен на работу в ОКБ Радиолокационного завода Минсудпрома СССР в Ростов-на-Дону. Работал там до июня 1952 г. инженером. В 1952 г. была опубликована его первая научная работа — статья «Кинетические процессы в атомных полупроводниках при учете рассеяния электронов на ионах примеси» в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» АН СССР. Летом 1952 г. вернулся в Ленинград, поступил в Ленинградский электротехнический институт связи им. Бонч-Бруевича на должность младшего научного сотрудника. Работал под руководством Исаака Моисеевича Меттера, заведующего кафедрой физики, тоже выпускника «Политеха», занимался вопросами электрических потерь в линиях связи.

Вторая печатная работа в журнале «Электросвязь» — «Металлизация изоляторов как средство уменьшения потерь в линиях связи при гололеде» была посвящена именно этой тематике. Работал в ЛЭИС до осени 1955 г., затем перешел на предприятие п/я 746 (так тогда назывался НИИ-3, затем ЦНИИ «Морфизприбор»). С этого момента до конца жизни судьба В. И. Клячкина оказалась неразрывно связана с прикладной гидроакустикой.

Как писал сам Владимир Исаакович, на новой работе пришлось решать задачи, носившие выраженный пограничный характер — исследование распространения звука в неоднородной морской среде для полей сигналов и шумов; генерация звука упругими конструкциями подводных лодок и надводных кораблей как носителей гидроакустической аппаратуры; статистическая гидродинамика; радиотехнические средства пространственно-временной статистической обработки информации для обеспечения помехоустойчивого приема и т.д.

Попав в НИИ-3, В. И. Клячкин начал работать инженером в лаборатории 31 у главного конструктора гидроакустической станции (ГАС) «Феникс» М. Ш. Штремта. Предметом исследований стала специфика работы антенн в ближних полях гидроакустической помехи, характерных для носителей ГАС — подводных лодок (ПЛ) и надводных кораблей (НК). Достаточно быстро таланты Владимира Исааковича были оценены, уже в январе 1956 г. он стал старшим инженером, руководителем научной группы. В представлении на эту должность начальник отдела отметил: «...за сравнительно короткий срок т. Клячкин проделал теоретическое исследование некоторых акустических систем, свидетельствующее о его склонности к научно-исследовательской работе, связанной с применением сложного математического аппарата».

В 1959 г. Клячкин участвует в НИР «Яшма» — программной работе, руководителем которой был его институтский однокашник и ближайший друг Р. Е. Пасынков. Работа, посвященная исследованиям повышения эффективности акустических систем, касалась многих направлений, но два из них непосредственно пересекались с научными интересами Клячкина — исследование факторов, определяющих помехоустойчивость гидроакустических систем по отношению к источникам шумов, возникающих при движении носителя, и исследование электроискровых систем в качестве источников излучения гидроакустических сигналов. В рамках НИР удалось организовать экспериментальные исследования в небольшом каплевидном обтекателе ГАС «Тамир-5», установленном на палубе ПЛ проекта 613.

В нем было установлено 8 гидрофонов, собранных в пространственную решетку. Сигналы от них заводились в прочный корпус носителя ГАС, где регистрировались уровни и характеристики пространственной корреляции поля помех. Фактически, это была первая в СССР работа по исследованию статистических характеристик поля помех в обтекателе ГАС.

В декабре 1960 г. во Львовском государственном университете им. Ивана Франко В. И. Клячкин защитил кандидатскую диссертацию. Тема диссертации «Некоторые вопросы статистической теории фазовых переходов в молекулярных и ионных кристаллах», исследования были начаты еще до прихода в «Морфизприбор». В 1963 г. ВАК СССР присвоил ему ученое звание старшего научного сотрудника по специальности «Теоретическая и математическая физика». Став кандидатом наук и руководителем НИР, в 1961 г. В. И. Клячкин назначен на должность старшего научного сотрудника. На этой должности он проработал до 1987 г., когда стал единственным в ЦНИИ «Морфизприбор» главным научным сотрудником.

В 1962 г. В. И. Клячкин назначается руководителем НИР «Кола». Эта НИР, посвященная разработке методов построения конформных приемоизлучающих антенн (совмещенных с обводами корабля), была пионерской работой — достаточно сказать, что первая такая антенна появилась в российском флоте только в 1990-е гг. XX в., почти через 40 лет после выполнения НИР. Предметом исследований в НИР «Кола» стало изучение направленных свойств, помехоустойчивости и конструктивного размещения антенн на носителях, распределения шумов по обводам корпуса как основы для выработки методов расчета помехоустойчивости, разработка конструкций антенн, устойчивых к влиянию собственных шумов носителя.

Работа была проделана титаническая — на ПЛ пр. 613 был установлен комплект датчиков, фиксирующих поле помех на корпусе носителя, аналогичные исследования были проведены на НК пр. 56. Были получены натурные результаты, позволившие установить статистические характеристики поля собственных шумов носителя. Сейчас, спустя 50 лет после завершения НИР, можно сказать, что сопоставимого по сложности и объему полученных результатов эксперимента за последующие годы не проводилось. Именно в рамках НИР «Кола» впервые возникла идея совместного приема и обработки полей давления и колебательной скорости — идея, «красной нитью» прошедшая через всю творческую деятельность Клячкина. Основой для такой идеи стала регистрация полей помех одновременно на датчики давления и вибродатчики, входившие в состав измерительного комплекса, разработанного в рамках НИР. Первые натурные

результаты такого объединения информации удалось получить в следующей НИР, возглавляемой В. И. Клячкиным — НИР «Айдар».

НИР «Айдар», начатая в 1966 году, была посвящена исследованиям методов создания антенн, совмещенных с обводами носителя – надводного корабля, и выполнялась в обеспечение создания ГАС «Полином». Предметом НИР стали теоретические исследования помехоустойчивости и направленности антенн, экспериментальные исследования параметров шумового поля эсминца пр. 56 и звукопрозрачности газовой пелены, возникающей при движении корабля. В рамках НИР на основе полученных экспериментальных материалов была выполнена оценка вкладов различных источников помех и проведена оценка параметров шумового поля перспективного корабля, на котором можно было бы поместить антенны. В работе удалось разработать методы расчета помехоустойчивости антенн, совмещенных с обводами надводного корабля, предложить асимптотический метод расчета направленных свойств антенн, сформулировать требования к преобразователям для антенн, совмещенных с обводами корпуса. Одним из важных результатов НИР «Айдар» стало установление факта неравномерности распределений уровней акустического давления и вибраций вдоль корпуса корабля. Экспериментально было показано, что линейная антенна, использующая в качестве информации давление и колебательную скорость, обеспечивает возрастание отношения сигнал/помеха на выходе тракта обработки примерно на 16–18 дБ. Эксперимент показал, что дальность поддержания контакта с целью с использованием такой антенны примерно на 50 % превысила дальность, обеспечиваемую антенной, состоящей только из приемников давления. Идея совместной обработки полей давления и колебательной скорости была оформлена В. И. Клячкиным совместно с В. В. Яковлевым (его многолетним соратником по работе с конца 1950-х и до начала 1990-х гг.) в заявку «Способ выделения сигналов на фоне поля помех» и по ней получено авторское свидетельство СССР № 35607 от 1966 г. Тем самым был зарегистрирован приоритет по данному направлению по отношению к другим коллективам исследователей, занимавшихся в СССР той же проблемой.

Фактически в рамках НИР «Кола» и «Айдар» удалось решить крупную научную проблему, связанную с возбуждением упругих конструкций случайными по пространству и времени, внешними силами и изгибающими моментами различной физической природы, и их влиянием на отношение сигнал/помеха на выходе тракта обработки ГАС. Результатом исследований, выполненных в цикле упомянутых НИР, стало установление однозначной связи выходного отношения сигнал/шум антенны как с ее собственной геометрией (габариты, период антенной решетки, условия размещения) и частотным диапазоном, так и с собственно конструктивными особенностями межбортного пространства (толщиной легкого и прочного корпусов ПЛ, их жесткостью на изгиб), определена роль затухания (поглощения) упругих вибраций, роль акустических экранов и т.п.

Начало 1970-х гг. Владимиром Исааковичем было посвящено написанию докторской диссертации. Тема работы — «О вероятностной структуре случайных полей излучения упругих оболочек». В институте прошла защита диссертации, на которой Е. Л. Шендеров, выступая в прениях, сказал: «...вы создали такое здание, стены и потолок которого еще долго будут для нас невидимыми...».

С 1975 по 1981 г. В. И. Клячкин руководил НИР «Баян». Сложнейшая, пионерская для института работа, посвященная исследованию путей создания гидроакустических антенн, адаптирующихся к изменяющимся условиям работы.

С точки зрения внедрения результатов в реальные системы НИР «Баян» был успешной работой. Результаты этой НИР нашли свое практическое применение в ОКР «Скат-КС», «Скат-БДРМ», «Скат-3», «Иртыш-Амфора» — практически во всех гидроакустических комплексах (ГАК) ПЛ, разрабатывавшихся в институте в конце 1970-х — начале 1980-х гг.

В 1983 г. решением ВАК при Совете Министров СССР В.И. Клячкину было присвоено ученое звание профессора по специальности «Акустика».

С середины 1980-х гг. Владимир Исаакович занимается тем, что называлось в институте «нетрадиционные методы». Это использование для повышения эффективности работы гидроакустического комплекса дополнительной информации, содержащейся в водной среде — совместная регистрация полей давления и колебательной скорости, использование низкочастотных и сверхнизкочастотных сигналов для обнаружения подводных объектов,

нелинейная акустика и многое другое. В 1985 г. В. И. Клячкин становится руководителем научно-технического направления, объединившего ряд работ по перспективной тематике — «Авача», «Минерал», «Вятка». Как руководитель направления он отвечает за формирование единой научно-технической методологии проведения исследований, координацию работ, формирование практических рекомендаций по результатам исследований в части внедрения разработанных новых методов и алгоритмов в создаваемые институтом изделия.

НИР «Вятка» была посвящена вопросам совместной регистрации и обработки полей давления и колебательной скорости — тематике, впервые показавшей свою полезность еще в НИР «Кола» и «Айдар». В рамках «Вятки-10» Клячкиным была построена теоретическая модель оценки выигрыша в помехоустойчивости векторно-фазового приема, связывавшая выигрыш в отношении сигнал/помеха с количеством каналов совместной обработки (один канал давления и три канала компонент поля колебательной скорости). Позднее, в 2004 г., эта модель была опубликована в статье «Статистический анализ векторно-фазовых характеристик акустических полей и алгоритмы их регистрации в «Акустическом журнале».

Еще одна работа, выполнявшаяся в тот момент времени в коллективе Клячкина — НИР «Мера-10». Предметом этой НИР, а вернее, составной части огромной государственной программы, было исследование сверхнизкочастотных сигналов и возможности их использования в задачах гидроакустического обнаружения.

В начале 1990-х гг. В. И. Клячкин со своей группой участвует в НИР «Комета-Метеор», где удалось провести несколько экспериментальных работ по тематике «нетрадиционных методов»: выполнен цикл натурных работ с антенной из векторно-фазовых приемников на подводном носителе, позволивший получить некоторые оценки по помехоустойчивости таких антенн в условиях преобладающих гидродинамических помех, и помех, обусловленных собственными шумами носителя, проведены исследования параметрического приемника, в экспедиции «Восток-90» в северо-восточной части Тихого океана, Охотском и Японском морях.

В 1991–1992 гг. выполняется ОКР «Аномалия-2ИИС», посвященная созданию измерительной системы для полигона, обеспечивающей измерение шумов носителей ГАК. В этой работе В. И. Клячкин строит оригинальный алгоритм измерения спектра шумов с использованием адаптивной векторно-фазовой системы, учитывающей искажение спектра, вносимого процедурой адаптации. Участвует он и в ОКР «Лири», посвященной проработке возможности создания гидроакустического комплекса для нового проекта неатомной ПЛ, предлагая создать в рамках этого ГАК тракт шумопеленгования с бортовой векторно-фазовой антенной.

В середине 1990-х гг. его группой выполняется серия НИР — «Поиск», «Поиск-2», «Поиск-3», — по созданию радиогидроакустического буя, решающего задачу обнаружения малозумных объектов на базе вертикально развитой антенной решетки из векторно-фазовых приемников.

С конца 1990-х гг. начинается НИР, ставшая последней завершенной работой для Владимира Исааковича — НИР «Флаг». К тому времени Военно-морской флот начал задумываться об облике подводной лодки нового поколения, ее задачах, особенностях систем радиоэлектронного вооружения. Была поставлена серия НИР, одна из которых была посвящена облику, структуре, задачам гидроакустического комплекса нового поколения. В мае 1998 г., научным руководителем НИР «Флаг» стал В. И. Клячкин. Важнейшая комплексная работа, посвященная созданию облика гидроакустического комплекса нового поколения как элемента интегрированной системы боевого управления, стала достойным завершением научной карьеры Владимира Исааковича. Работа выполнялась с 1999 по 2005 г., ее объем составляет более 50 томов.

Работа растянулась на шесть лет, была успешно сдана заказчику в 2005 г. В рамках НИР удалось объединить в единый комплекс различные предложения по повышению эффективности работы ГАК, полученные за годы работы в лаборатории перспективных исследований, выполнить цикл натурных исследований на Ладужском полигоне с фрагментами бортовой векторно-фазовой антенны в условиях преобладающей структурной и гидродинамической помехи. Неожиданно интересной для В. И. Клячкина оказалась тематика взаимодействия гидроакустики и гидрофизики — совместная обработка акустических и неакустических полей в условиях пространственно-временного разрыва, обусловленного различиями в условиях

распространения полей разной физической природы. По результатам НИР «Флаг» и по инициативе ее заказчика В. И. Клячкину в 2006 г. было присвоено звание «Почетный машиностроитель».

После окончания НИР «Флаг» в деятельности Владимира Исааковича уже не было крупных НИОКР. Новые формы взаимодействия государства и науки еще не сформировались. Сказывался и возраст В. И. Клячкина — ему было уже за 80. Но сидеть без дела Владимир Исаакович не мог. Возникла задумка написать книгу, в которой были бы опубликованы и результаты диссертационных исследований, и основные теоретические модели, полученные в рамках выполненных работ.

Первый том монографии, изданный в рамках гранта РФФИ, вообрал в себя в основном материалы диссертационной работы Владимира Исааковича. Но ведь после нее было еще 40 лет поисков, открытий, находок. И появилась идея второго тома, который включил бы в себя результаты работ, касающихся вопросов векторно-фазовой обработки, взаимодействия акустических и неакустических полей, задач построения интегрированных систем наблюдения. Благодаря поддержке руководства ГЭТУ, в 2011 г. удалось издать второй том. К сожалению, эта книга стала последней в жизни Владимира Исааковича. Он успел еще поддержать ее в руках, надписать несколько экземпляров, но времени оставалось совсем немного — 14 февраля 2012 г. Владимира Исааковича не стало.

Он прожил большую, долгую и яркую жизнь. Был уважаем, востребован, известен как большой ученый, признанный специалист в области прикладной гидроакустики. Многие годы Клячкин являлся одним из лидеров научной жизни Института. Он был членом диссертационного совета, пленума научно-технического совета, проректором народного университета по научной работе, членом научно-методической комиссии. Член диссертационных советов Электротехнического университета, 24 ЦНИИ МО, член редсовета научно-технического сборника «Гидроакустика». Много лет являлся председателем Совета НТО им. академика А. Н. Крылова, членом бюро одной из секций областного правления НТО и научным руководителем периодического отраслевого семинара секции НТО по случайным процессам в судостроении. Руководил секцией Восточно-Европейской ассоциации акустиков по обработке акустической информации. Был членом секции № 5 Совета по гидрофизике АН СССР. Успешно преподавал — им был разработан и успешно проведен лекционный цикл для студентов Дальневосточного политехнического института. В период 1978–1980 гг. В. И. Клячкин в качестве избранного по конкурсу Советом СЗПИ профессора кафедры читал курс высшей математики студентам СЗПИ. Им прочитаны курс лекций для специалистов отрасли по методам обработки многоканальной гидроакустической информации, несколько курсов лекций в Институте повышения квалификации Минсудпрома по статистической гидроакустике.

Владимир Исаакович великолепно владел математическим аппаратом, обладал исключительным физическим чутьем в тех областях, где проводил исследования — в области синтеза и анализа алгоритмов пространственно-временной обработки случайных и неоднородных гидроакустических полей; векторно-фазовой акустики, создания оптимальной алгоритмической базы на основе анализа случайных полей линейного, параметрического и нелинейного типов и др. В. И. Клячкин являлся автором более 180 научных публикаций, в том числе двухтомной монографии. Научные исследования и прикладные разработки его и учеников сформировали научную школу в области прикладной статистической гидроакустики.

Государство признало его военные и трудовые заслуги. Он был награжден орденами «Отечественной войны» 1 и 2 степени, многими медалями, имел звание «Почетный машиностроитель». Когда в концерне «Океанприбор» был учрежден почетный знак «За вклад в прикладную гидроакустику», среди первых трех его обладателей был и В. И. Клячкин.

### *Литература*

1. Селезнев И.А., Сергеева Н.П. Люди и годы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. Часть 2. 346 с.

# ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

## АНАЛИЗ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖУЩИХСЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

О. А. Андреев, канд. техн. наук, В. Н. Кравченко, канд. техн. наук, А. Т. Трофимов, д-р техн. наук  
АО «НИИ «Атолл», Дубна, Россия

## ANALYSIS OF THE WORK OF ALGORITHMS FOR DETECTING TRAJECTORIES OF MOVING MARINE OBJECTS BY HYDROACOUSTIC SURVEILLANCE SYSTEMS

O. A. Andreev, Ph.D., V. N. Kravchenko, Ph.D., A. T. Trofimov, Dr.Sc.  
JSC «Scientific and Research Institute «Atoll», Dubna, Russia

*При многократных измерениях текущих характеристик (пеленг, дальность, скорость) наблюдаемых объектов, движущихся в водной среде, возникает задача принятия решения об обнаружении траекторий и оценивания их параметров. В докладе рассматриваются вопросы оценки параметров гидроакустических сигналов, отраженных или излученных наблюдаемыми объектами, с использованием процедур цифровой обработки изображений. Путем компьютерного моделирования проанализирована вероятность обнаружения траекторий.*

*During multiple measurements of current characteristics (bearing, range, velocity) of observed moving marine objects there appears a problem of detection of the trajectories of the objects and estimation of the parameters of the trajectories. The paper addresses the issues of estimating the parameters of the hydroacoustic signals, reflected or emitted by the observed marine objects, using methods of digital image processing. Probability of detection of the trajectories is analyzed using computer modeling.*

**Введение.** Одной из основных задач гидроакустических систем (ГАС) является обнаружение движущихся морских объектов и определение параметров их движения. Информация о наблюдаемых морских объектах, полученная по однократным наблюдениям в процессе первичной обработки, не позволяет решать указанную задачу с заданной точностью и надежностью. Более полную информацию о наблюдаемых морских объектах получают по многократным наблюдениям в процессе вторичной (траекторной) обработки. Целью траекторной обработки является обнаружение траекторий и последующее сопровождение движущихся морских объектов наряду с оценкой параметров этих траекторий.

В процессе траекторной обработки необходимо решить большое количество проблем, например, проблему селекции (ассоциации первичных отметок с сопровождаемыми траекториями), проблему завязывания большого количества траекторий, проблему уменьшения вероятности ложного обнаружения траекторий, проблему увеличения времени сопровождения истинных траекторий и т.д. [1].

Поскольку исходные данные для первичной и вторичной обработки могут быть представлены в виде изображений (рис. 1), для решения названных проблем логичным представляется использование методов цифровой обработки изображений. В статье рассматривается один из возможных подходов к применению методов цифровой обработки изображений при решении задачи вторичной обработки гидроакустических сигналов.

**Модель движения объектов.** В процессе траекторной обработки как правило используется модель движения объектов, описываемая системой линейных уравнений состояния. В рамках этой модели в уравнения состояния дополнительно вводят шум, учитывающий неполноту знаний об истинной модели движения объекта и различные флуктуации траектории [1, с. 281–286].

Анализ данных, полученных по результатам натуральных испытаний и имитационного моделирования работы ГАС (рис. 1), показал, что на коротких (5–10 наблюдений) временных интервалах траектории морских объектов являются квазилинейными. Тогда, учитывая допустимые параметры движения морских объектов и особенности функционирования ГАС, можно сформировать набор гипотез о возможных линейных траекториях движения морских объектов на указанных временных интервалах.

По каждой сформированной гипотезе создается матрица (рис. 2), отражающая траекторию движения морского объекта и называемая маской при цифровой обработке изображений [2]. Более сложные гипотезы могут быть сформированы, например, путём кластеризации имитационных или экспериментально полученных траекторных данных морских объектов.

**Обнаружение и оценка параметров отдельной траектории.** В основе цифровой обработки изображений лежит операция фильтрации, выполняемая путем свёртки обрабатываемых изображений со специально заданными масками. Для современной вычислительной техники, в особенности специализированной, операция вычисления свертки, в том числе многократная, не вызывает каких-либо затруднений.

Определим операцию свёртки следующим образом (вычислениями на границах матриц пренебрежем):

$$Y_{m,c+s(m)} = \sum_{h=1}^{H_m} \sum_{w=1}^{W_m} X_{N-H_m+h,c+w-1} \cdot Q_{h,w}^m, \quad (1)$$

где  $Y$  — матрица результатов фильтрации;  $m = 1 \dots M$  — номер текущей маски;  $M$  — количество используемых масок;  $c = 1, C$  — номер обрабатываемого канала;  $C$  — количество обрабатываемых каналов;  $s(m)$  — смещение траектории, определяемой  $m$ -й маской, относительно первого канала этой маски;  $H_m$  — количество строк в  $m$ -й маске;  $W_m$  — количество столбцов в  $m$ -й маске;  $X_{n,c}$  — отсчеты матрицы траекторных данных  $n = 1, \dots, N$  — номера наблюдений;  $N = \max(H_1, \dots, H_m)$  — количество совместно обрабатываемых наблюдений;  $Q^m$  — матрица отсчетов  $m$ -й маски.

Матрицу траекторных данных  $X$  зададим таким образом, чтобы её элементы  $X_{n,c}$ ,  $n \in \{1, \dots, N\}$ ,  $c \in \{1, \dots, C\}$  равнялись единице, когда по результатам первичной обработки наблюдения  $n$  принимается решение о наличии цели в канале  $c$ . Тогда при условии использования бинарных (рис. 2) масок результат вычисления выражения (1) будет иметь смысл количества отметок первичной обработки, попавших в траекторию, определяемую  $m$ -й маской.

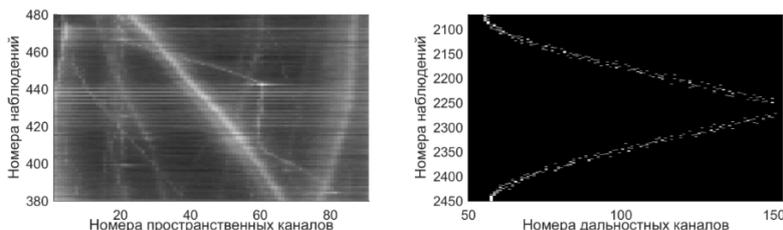


Рис. 1. Результат пространственной обработки низкочастотных гидроакустических сигналов (слева) и моделирование результатов первичной обработки в гидролокаторе (справа).

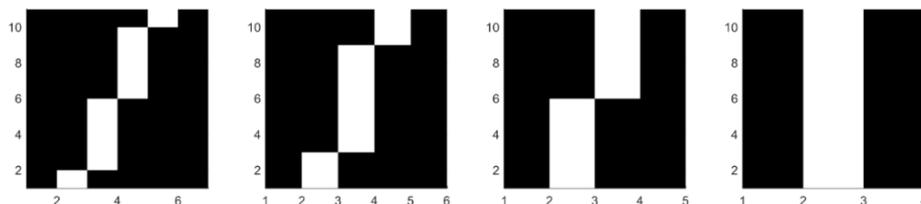


Рис. 2. Примеры масок, соответствующих различным гипотезам о прямолинейном движении морских объектов.

Черные пиксели соответствуют нулевым значениям маски (фон); белые пиксели — единичным (траектория); по оси абсцисс отложены номера обрабатываемых каналов (например, дальностных или пространственных); по оси ординат — номера наблюдений.

Знание вероятности  $P_{отм}$  обнаружения цели по отдельной отметке первичной обработки позволяет [1, с. 288] получить вероятности  $P(k|m, P_{отм})$  попадания  $k$  отметок первичной обработки в траекторию, определяемую  $m$ -й маской, согласно (2) и вероятность  $P_{тр}(K|m, P_{отм})$  попадания  $K$  и более отметок первичной обработки в траекторию, определяемую  $m$ -й маской, согласно (3), что дает нам правило обнаружения траекторий (4):

$$P(k|m, P_{отм}) = \frac{H_m!}{k! \cdot (H_m - k)!} \cdot P_{отм}^k \cdot (1 - P_{отм})^{H_m - k}; \quad (2)$$

$$P_{тр}(K|m, P_{отм}) = \sum_{k=K}^{H_m} P(k|m, P_{отм}); \quad (3)$$

$$Y_{m, c+s(m)} \geq K. \quad (4)$$

Правило обнаружения траекторий (4) является известным правилом обнаружения траекторий « $r$  из  $m$ » + « $l$  из  $n$ » [1, с. 330] в виде « $K$  из  $H_m$ ». Значение порога  $K$  обнаружения траектории выбирается по результатам вычисления вероятностей ложного обнаружения траектории  $F_{тр} = P_{тр}(K|m, F_{отм})$  и правильного обнаружения траектории  $D_{тр} = P_{тр}(K|m, D_{отм})$ , где  $F_{отм}$  и  $D_{отм}$  — вероятности ложного и правильного обнаружения цели по отдельной отметке первичной обработки соответственно.

Пример результатов вычисления рабочих характеристик четырех обнаружителей для сигнала и помехи, амплитуды которых распределены по релейскому закону, приведен на рис. 3.

Операция (1) реализует накопление первичных отметок и близко соответствует закону увеличения исходного отношения сигнал/шум в  $\sqrt{H_m}$  раз. Результатами обнаружения согласно (1) и (4) являются оценка  $c + s(m)$  положения цели в момент времени, соответствующий наблюдению  $N$ , и оценка изменения положения цели в виде траектории, заложенной в маске. Указанные характеристики могут быть использованы при сопровождении цели.

**Алгоритм обнаружения траекторий.** По результатам  $N$  наблюдений формируется матрица траекторных данных  $X$  и сворачивается согласно (1) с множеством заранее сгенерированных масок (рис. 4).

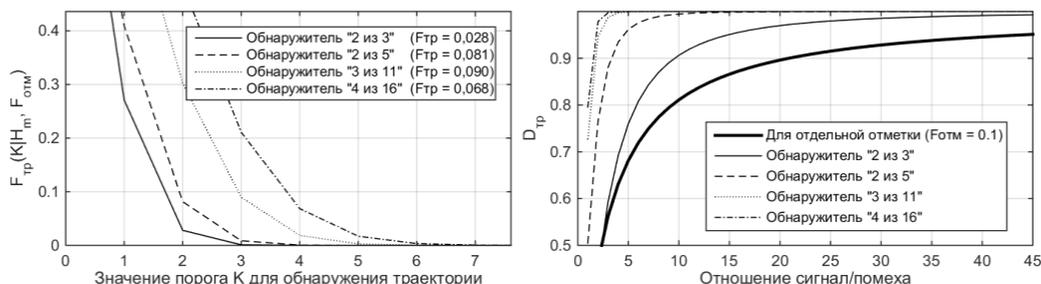


Рис. 3. Вероятности ложного обнаружения траектории  $F_{тр}$  для выбора порогового значения  $K$  обнаружителей по 3, 5, 11 и 16 наблюдениям (слева) и вероятности правильного обнаружения траекторий  $D_{тр}$  для этих обнаружителей при различных отношениях сигнал/помеха и  $F_{отм} = 0,1$ .

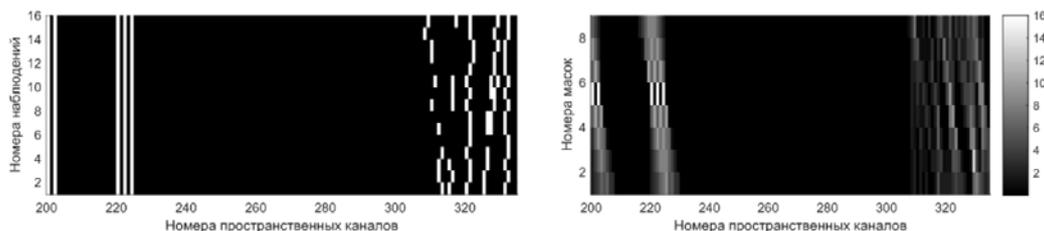


Рис. 4. Модельная матрица траекторных данных  $X$  (слева) и результат свёртки матрицы траекторных данных с бинарными масками высотой  $H_m = 16$  наблюдений (справа).

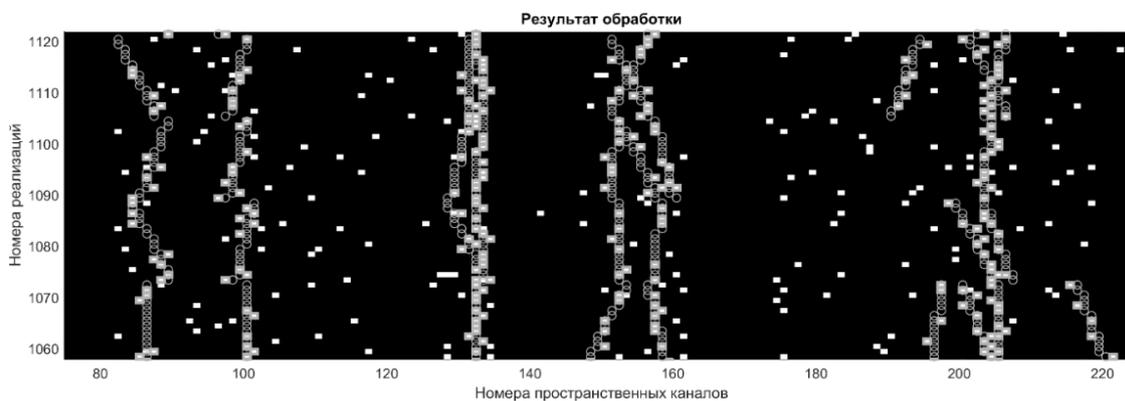


Рис. 5. Пример результатов обнаружения траекторий с использованием описанного алгоритма.

Белые прямоугольники — отметки первичной обработки; серые окружности — траектории, определяемые масками; серыми линиями обведены отметки первичной обработки, привязанные к траекториям; обработка производилась блоками по 16 наблюдений, порог обнаружения  $K = 5$ .

В полученной по результатам свёртки матрице  $Y$  ищется максимальный элемент (в общем случае — первый среди множества максимальных). Указанный максимум характеризуется номером канала  $\hat{c}$ , в котором оканчивается потенциальная траектория, номером маски  $\hat{m}$ , задающей вид потенциальной траектории, и количеством отметок первичной обработки  $\hat{y}$ , попавших в эту траекторию.

Для найденного максимума проверяется условие (4). Если условие выполнено, данные  $\{\hat{c}, \hat{m}, \hat{y}\}$  о траектории заносятся в формуляр, затем отсчеты матрицы траекторных данных  $X$ , по которым принято решение об обнаружении траектории, обнуляются, а для отсчетов матрицы  $Y$ , в вычислении которых участвовали обнуленные отсчеты матрицы  $X$ , расчет (1) проводится повторно, после чего ищется новый максимум. Если условие (4) не выполняется, обработка матрицы  $X$  считается завершённой.

Пример результатов работы описанного алгоритма обнаружения траекторий на экспериментально полученных данных с низкочастотной гидроакустической системы показан на рис. 5. Из шести истинных постоянно наблюдаемых траекторий были обнаружены шесть. Также были обнаружены участки траекторий удаленных объектов, не создающих сколь либо сплошной поток отметок первичной обработки.

**Выводы.** В статье описан подход к использованию процедур цифровой обработки изображений при траекторной обработке гидроакустических сигналов. Описанный подход представляет собой известное правило обнаружения траекторий « $r$  из  $m$ » + « $l$  из  $n$ », реализуемое с использованием дискретной (или быстрой) свёртки и характеризующееся заданной вероятностью ложного обнаружения траекторий. Обнаружение траектории согласно предложенному подходу, автоматически дает начальные оценки параметров траектории, которые можно использовать в дальнейшем сопровождении, и может быть также использовано в качестве критерия сброса сопровождаемых траекторий.

Предлагаемый подход также потенциально может быть использован для формирования отметок первичной обработки при низких отношениях сигнал/помеха по результатам пространственно-временной обработки исходных гидроакустических сигналов, что, однако, потребует его значительной модификации.

#### Литература

1. Васин В. А., Власов И. Б., Егоров Ю. М. и др. Информационные технологии в радиотехнических системах / Под ред. И. Б. Федорова. М.: Изд-во «МГТУ им. Н. Э. Баумана», 2003. 627 с.
2. Вудс Р. Г., Эдинс Р. С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.

## МЕТОД ТРАЕКТОРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ИСТОЧНИКОВ

Г. И. Лосев

ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская область, Россия

## METHOD OF TRAJECTORY-SPATIAL FILTERING OF NOISE EMISSION FROM MOVING SOURCES

G. I. Losev

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

*В ФГУП «ВНИИИФТРИ» был достигнут ряд успехов в применении векторно-фазовых методов для измерений и поиска источников повышенного шумоизлучения движущихся объектов, чья эффективность в значительной степени зависит от точности определения проходных характеристик исследуемых шумящих объектов в условиях зашумленных акваторий. Был разработан метод траекторно-пространственной фильтрации потоков акустической мощности (ПАМ) и проведено исследование его эффективности. Метод позволяет эффективно выделять акустические характеристики движущегося источника шумоизлучения в длительном промежутке времени и подавлять окружающие мешающие источники.*

*FSUE «VNIIFTRI» has achieved a number of successes in the application of vector-phase methods for measuring and searching for sources of increased noise emission of moving objects, whose efficiency largely depends on the accuracy of determining the throughput characteristics of the studied squelching objects in noisy water areas. A method for trajectory-space filtration of acoustic power fluxes (PAM) was developed and its efficiency was investigated. The method makes it possible to effectively isolate the acoustic characteristics of a moving noise source in a long time, interval and to suppress the surrounding noise emission sources.*

В настоящее время в гидроакустике актуальными являются задачи обеспечения измерений уровней подводных шумов объектов на ходовых режимах при соотношении сигнал/шум до (10–15) дБ в диапазонах частот от 10 Гц до 10000 Гц и определения координат зон повышенного шумоизлучения подвижных морских объектов (ПМО) [1]. Результаты исследований методов измерений параметров первичных гидроакустических полей ПМО, основанных на классических методах гидроакустики с применением одиночных гидрофонов или с использованием протяженных гидроакустических антенных цепочек как на стояночных, так и на ходовых режимах показало, что эти методы имеют ряд существенных недостатков, такие как: недостаточная для решения современных задач гидроакустики точность определения координат зон повышенного шумоизлучения; малая информативность о структуре исследуемых с их помощью параметров первичных гидроакустических полей; чрезвычайно высокая сложность выполнения и освоения; высокая стоимость реализации; невозможность применять многие из них для проведения испытаний как на стояночных режимах, так и на ходовых режимах.

Перспективными являются методы, основанные на измерении векторно-фазовых характеристик гидроакустических полей. В ФГУП «ВНИИИФТРИ» был достигнут ряд успехов в создании комбинированных гидроакустических (векторных) приемников (КГП) и применении векторно-фазовых методов для измерений и поиска источников повышенного шумоизлучения морских объектов, в том числе на ходовых режимах. Точность этих методов в высокой степени зависит от точности определения спектральных и проходных характеристик исследуемых шумящих объектов, что является исключительно сложной задачей в условиях зашумленных акваторий. Для увеличения точности определения спектральных и проходных характеристик исследуемых шумящих объектов был разработан метод траекторно-пространственной фильтрации, который использует свойство пространственной избирательности приемного модуля, содержащего КГП, для выделения акустических характеристик движущегося источника шумоизлучения в длительном промежутке времени для подавления окружающих источников шумоизлучения.

Метод траекторно-пространственной фильтрации основан на обработке измеренных с помощью КГП трех взаимно ортогональных компонентов вектора колебательной скорости и поля давления и рассчитанных по ним проекций потоков акустической мощности (ПАМ) на заданные направления, т.е. на прямом измерении потока акустической энергии (мощности),

излучаемой источниками ПМО в направлении на КГП [2, 3]. Данные для траекторно-пространственной фильтрации могут быть получены из наблюдений за объектом, по результатам применений сторонних датчиков и приборов определения пространственного положения объекта исследования, а также по результатам расчета временно-углового распределения (ВУР) ПАМ. Метод, исходя из полученных данных, позволяет построить пространственный контур, включающий в себя траекторию движения исследуемого источника излучения для каждой единичной выборки сигнала длиной  $\tau_0$  с помощью интерполяции кубическим сплайном. Затем, после восстановления частотного спектра сигналов с применением дискретного преобразования Фурье (ДПФ), на заданной частоте  $f_0$  для каждой дискретной узкополосой составляющей сигнала с номером  $q$  со средней частотой поддиапазона  $f_i$  в заданном частотном диапазоне  $\Delta f$  определяются азимутальный угол  $\varphi_i$  и полярный угол  $\vartheta_i$  прихода сигнала по формуле (2) и интенсивность  $I_i$  этого сигнала, представляющая значение модуля вектора потока акустической мощности в направлении, определяемом углами  $\varphi_i$  и  $\vartheta_i$  (3), где  $W_{Rxi}$ ,  $W_{Ryi}$  и  $W_{Rzi}$  проекции потока акустической мощности на направления  $r = x, y, z$  [4]. Если значение интенсивности сигнала выборки  $q$  не равняется 0, значение соответствующего ему азимутального угла  $\varphi_i$  находится в пределах заданного контура и значение угла  $\vartheta_i$  находится в пределах заданного телесного угла плоскости XZ, то значение интенсивности сигнала записывается в результирующий массив. В противном случае значение интенсивности игнорируется. Затем производится переход к следующей выборке ( $q + 1$ ) и повторяют процедуру, получая массив значений  $I_{(q+1)}(\varphi_n)$  для следующего момента времени, отстоящего на  $\Delta t$  от предыдущего, а результаты последовательных отсчетов усредняют, получая при достаточно большом времени усреднения распределение  $I(\Delta f, \varphi_n)$

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 ; \quad (1)$$

$$\varphi_i = \arcsin \frac{W_{Ryi}}{\sqrt{W_{Rxi}^2 + W_{Ryi}^2}} \quad \theta_i = \arccos \frac{W_{Rzi}}{\sqrt{W_{Rxi}^2 + W_{Ryi}^2 + W_{Rzi}^2}} ; \quad (2)$$

$$I_i(\varphi_i) = \sqrt{W_{Rxi}^2 + W_{Ryi}^2} \quad \text{или} \quad I_i(\varphi_i, \vartheta_i) = \sqrt{W_{Rxi}^2 + W_{Ryi}^2 + W_{Rzi}^2} . \quad (3)$$

С целью исследования эффективности разработанного метода траекторно-пространственной фильтрации ПАМ была проведена обработка результатов натурных измерений уровней подводного шумоизлучения рабочего катера, совершавшего движение в течении одного часа относительного приёмного модуля, содержащего КГП, по заданной траектории. В устье реки на расстоянии 35–40 м от судна обеспечения (СО), стоявшего на якоре у причала, на глубине 7 м был установлен приёмный модуль (ПМ), состоящий из широкополосного гидрофона, КГП и электронного компаса. Для проверки эффективности траекторной фильтрации источников шумоизлучения по корпусу СО были установлены три излучателя. Каждый излучатель имел свою заданную амплитуду и частоту излучения. Был проведен расчет и построение графика время-углового распределения ПАМ (рис. 1) по результатам измерений КГП-1, зарегистрированным в течении одного часа в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц. На графике можно наблюдать несколько источников, находящихся в угловом секторе от 50° до 100°, один источник, направление излучения которого изменяется с течением времени и мощность излучения которого также изменяется по мере приближения и удаления от ПМ. Полученная из графика ВУР траектория движущегося источника была сопоставлена с известной траекторией движения рабочего катера, что показало их полное соответствие. Контур траектории движения катера был выделен на графике ВУР и точки контура сохранены для передачи программе в качестве входных данных. Были построены графики сонограмм результатов спектральной обработки ПАМ, рассчитанных по результатам измерений КГП в течении часа без применения дополнительной обработки (рис 2, а), с применением траекторно-пространственной фильтрации источников шумоизлучения в заданном контуре (рис. 2, б) и с применением метода фильтрации вне пространственного контура (рис. 2, в.).

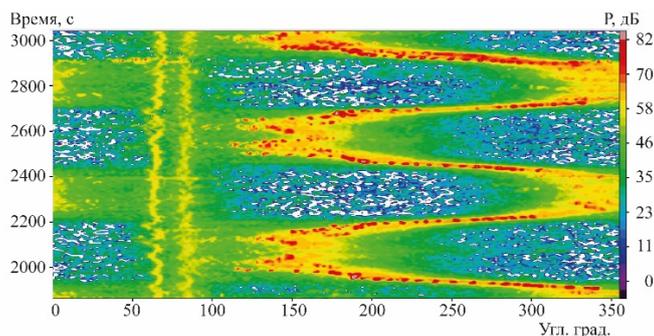


Рис. 1. График ВУР ПАМ, полученный по результатам обработки измерений с КПП-1 в течении одного часа в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц.

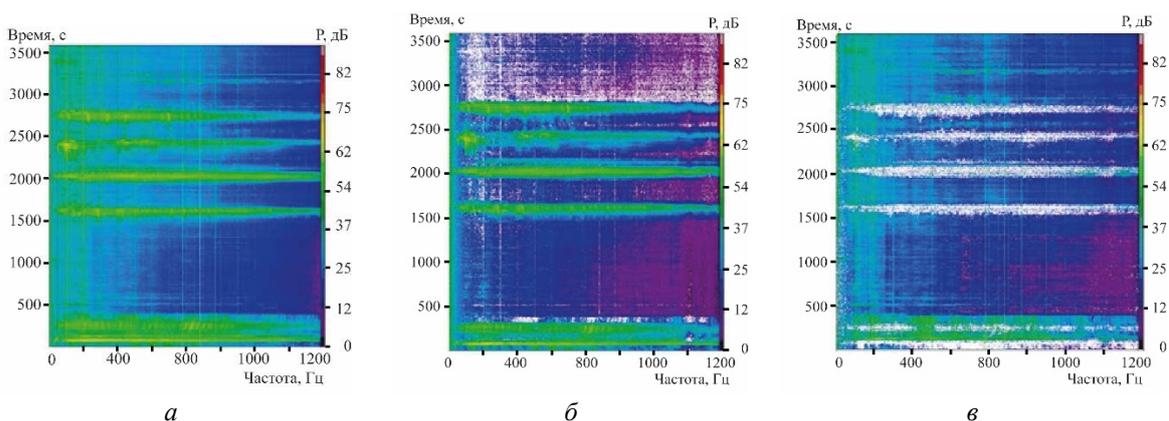


Рис. 2. Сонограммы ПАМ, рассчитанные по результатам измерений КПП-1.

*а* — без использования дополнительной обработки; *б* — с применением метода траекторно-пространственной фильтрации внутри заданного траекторного контура; *в* — с применением метода траекторно-пространственной фильтрации вне заданного траекторного контура.

На графике сонограммы результатов расчета ПАМ (рис. 2, *б*) наблюдается подавление уровней окружающих ненаправленных шумов во всём частотном диапазоне на 5–20 дБ по сравнению с исходным графиком, кроме временных отрезков и частотных диапазонов, вошедших в заданный контур и соответствующих траектории движения рабочего катера. Также наблюдается полное подавление источников шумоизлучения, установленных на СО и источников шумоизлучения, связанных с работой внутренних механизмов СО. Таким образом метод позволит оптимизировать определение частотных диапазонов источников повышенного шумоизлучения движущихся объектов с целью определения их координат.

Применение метода траекторно-пространственной фильтрации вне заданного контура позволило, напротив, исключить из результата обработки источники шумоизлучения рабочего катера при сохранении уровней шумоизлучения источников СО и подавить уровни окружающих ненаправленных источников шумоизлучения. Такой способ применения метода востребован при определении координат источников шумоизлучения на корпусе объекта на стояночных режимах. Метод также применим при расчёте проходных характеристик и диаграмм направленности излучения источников шумоизлучения по результатам расчётов ПАМ.

На рис. 3. приведена проходная характеристика тех же источников шумоизлучения, но в частотном диапазоне от 29 Гц до 31 Гц, построенная при усреднении в 9 с. Красной линией на графике изображена проходная характеристика, рассчитанная по результатам измерений каналом давления КПП, черным — по результатам расчёта ПАМ без применения дополнительной обработки, серым — по результатам расчёта ПАМ с применением метода траекторно-пространственной фильтрации.

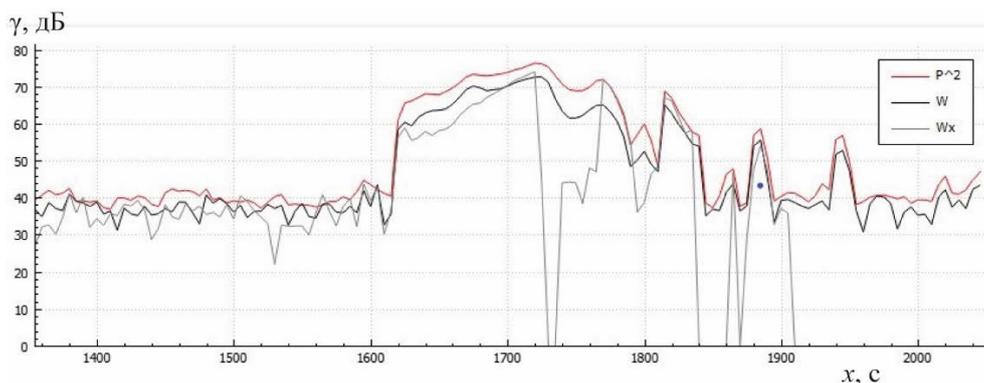


Рис. 3. Проходная характеристика источника шумоизлучения в диапазоне частот от 29 Гц до 31 Гц.

Красная линия — проходная характеристика, полученная по результатам измерения давления; темно-серая линия — проходная характеристика, полученная по результатам расчёта ПАМ без применения дополнительной обработки; светло-серая линия — проходная характеристика, полученная по результатам расчёта ПАМ с применением метода траекторно-пространственной фильтрации.

Из рис. 3 можно сделать вывод, что уровни окружающих шумов при расчёте потока акустической мощности на 5–10 дБ ниже, чем при прямом измерении акустического давления с помощью канала гидрофона из состава КГП, при сохранении формы проходной характеристики. Расчёт интенсивности акустической мощности с применением метода траекторно-пространственной фильтрации, за счет исключения источников шумоизлучений, не попавших в заданный траекторный контур, позволил уменьшить уровни проходной характеристики в отдельные моменты времени, совпадающие с временем отсутствия в выделенном контуре рабочего катера, вплоть до –40 дБ.

Практическая ценность этого результата заключается в увеличении точности определения моментов времени обнуления проекций векторов потоков акустической мощности излучения движущегося объекта в выбранных частотных диапазонах, что в свою очередь повышает точность определения координат излучения на корпусе движущегося объекта.

В результате исследования метода траекторно-пространственной фильтрации потоков акустической мощности было получено, что метод позволяет эффективно выделять акустические характеристики движущегося и исследуемого источника шумоизлучения в длительном промежутке времени и подавлять уровни окружающих мешающих источников шумоизлучения вплоть до значения минус 40 дБ. Техническим результатом, полученным от применения метода траекторно-пространственной фильтрации в совокупности с методами векторно-фазовой обработки сигналов, является увеличение точности определения координат зон излучения источников на корпусе исследуемого объекта в условиях зашумленных акваторий.

#### *Литература*

1. Некрасов В. Н. Основные направления развития рабочих средств гидроакустических измерений // Матер. юбил. межотрсл. науч.-практ. конф. «ПОЛИГОН-2003». СПб. 2003. С. 200–203.
2. Гордиенко В. А., Краснописцев Н. В., Некрасов В. Н., Торопов В. Н. Локализация источников излучения на корпусе корабля при одновременном использовании комбинированного приемника и методов спектрального анализа с высоким разрешением // Ак. журн. 2011. Т. 57, № 2. С. 1–13.
3. Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
4. Лосев Г. И. Векторно-фазовые алгоритмы выделения источников акустического загрязнения на фоне естественных шумов акватории / Под ред. Г. И. Лосев, В. Н. Некрасов // Матер. междуна. науч.-практ. конф. «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2020». Севастополь, 14–17 сентября 2020 г. / Под ред. Г. В. Кучерик, Ю. А. Омельчук. Севастополь: ФГАОУВО «Севастопольский государственный университет», 2020. С. 333–338.

## ВЫБОР СТРОБОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИСТАНЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ПАССИВНОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ТРАЕКТОРНОГО АНАЛИЗА

О. О. Обуховская, А. А. Янпольская

АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## THE CHOICE OF STROBES FOR THE DISTANCE ASSESSMENT BY HYDROACOUSTICS PASSIVE SYSTEM ON THE BASIS OF THE TRAJECTORY ANALYSIS

O. O. Obukhovskaya, A. A. Yanpolskaya

JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*В данной статье рассматриваются различные подходы к построению стробов при оценке дистанции, основанной на методе фокусировки. В процессе исследования были смоделированы статистики попадания в строб максимума величины отклика системы для неподвижного источника при разных отношениях «сигнал-помеха». На основе полученных данных было проведено сравнение предложенных вариантов построения стробов. Результаты данного исследования могут быть применены в дальнейшем при траекторном анализе для приемной пассивной гидроакустической системы.*

*This article examines various approaches to the plotting of strobes when estimating range based on the focusing method. In the course of the study, statistics of the target falling within the strobe of the system maximum response value were modeled for different signal-to-noise ration. Based on the data obtained, a comparison of the proposed strobe plotting options is carried out. In the future, the result of this study can be applied in trajectory analysis for the receiving passive hydroacoustic system.*

Для повышения полноты информационного обеспечения ГАК с соблюдением скрытности возникает необходимость применения пассивных средств оценки дистанции при обработке гидроакустической информации [1, 2]. Так одной из важных задач, возникающих на этапе третичной обработки, является операция отождествления последовательных оценок дистанций (Д), качество которых существенным образом зависит от выбора вида и параметров строба [3, 4].

В данной работе рассматривается задача стробирования при упрощенной процедуре третичной обработки оценки Д в зоне излучения источника с круговым волновым фронтом [5]. В общем случае при одноэтапной процедуре оценки двух параметров [3, 4] принято использовать эллиптический строб, однако для разнесенных антенн [5] в случае, когда в системе вторичной обработки предусмотрена АСЦ, обеспечивающая достаточно точное сопровождение по углу, допустимо вести строб только по Д. Именно этот частный случай был рассмотрен на примере модели системы из трех одинаковых плоских антенн, расположенных в одной плоскости.

Предполагается, что в простейшем случае для сильных сигналов в качестве оценки Д можно брать положение по Д абсолютного максимума в окрестности истинного положения цели по углу при фокусировке по шкале Д. Таким образом, задача определения строба может быть сформулирована следующим образом: для дистанции  $D_0$  при большом значении отношения «сигнал/помеха» по имеющимся откликам системы  $Z_{D_0}(d_i)$ , где  $\{d_i\}_{i=1}^n$  пробегает весь диапазон дистанций с фиксированным шагом, определить строб  $[St_L; St_R]$ , соответствующий максимуму отклика системы при нулевом значении угла. В данной статье будет рассмотрено четыре метода определения начального строба.

Естественным является метод определения строба  $[St_L, St_R]$  через известную приборную ошибку. В таком случае, строб рассматривается как ширина характеристики направленности на определенном уровне  $\alpha$  от максимума отклика системы  $D_0$  и определяется следующими формулами:

$$\begin{aligned} St_L &= \max\{d_i | Z_{norm_i}^{D_0}(d_{i-1}) < \alpha, d_i \leq D_0\}; \\ St_R &= \min\{d_i | Z_{norm_i}^{D_0}(d_{i+1}) < \alpha, d_i \geq D_0\}; \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Z_{norm_i}^{D_0}(d_i) = \frac{Z_{D_0}(d_i) - \min(Z_{D_0}(d_i))}{\max(Z_{D_0}(d_i)) - \min(Z_{D_0}(d_i))}$ .

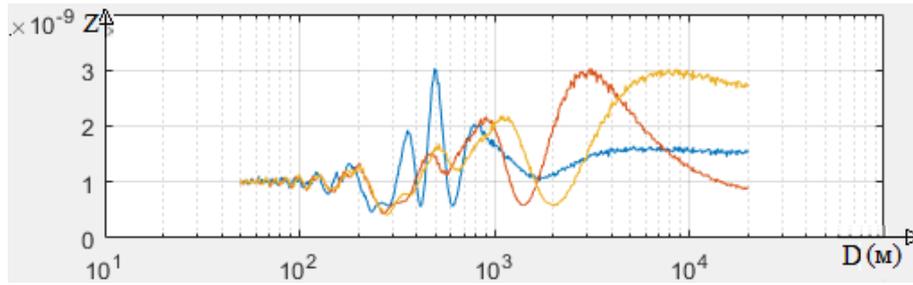


Рис. 1. Отклик системы для дистанций 500 м, 3000 м и 8000 м в логарифмическом масштабе.

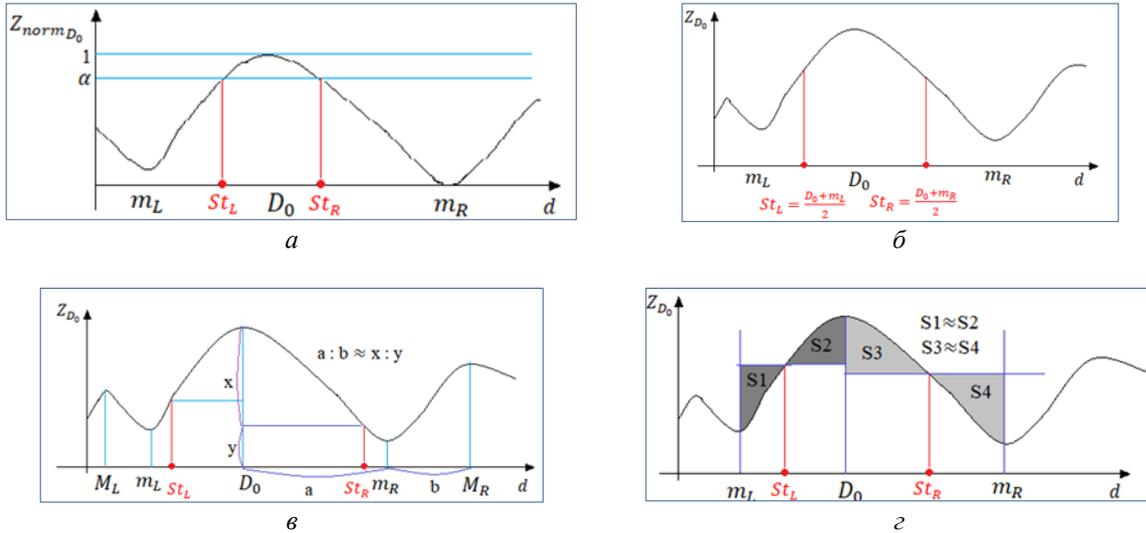


Рис. 2. Методы определения строга для дистанции  $D_0$ .

Стоит отметить, что такой метод определения строга применим только в том случае, когда боковые лепестки характеристики направленности достаточно малы. Графики отклика системы при различных истинных положениях цели приведены на рис. 1, а данный метод построения строга проиллюстрирован на рис. 2, а.

При следующем методе построения строга  $[St_L, St_R]$  учитываются значения ближайших минимумов к максимуму  $D_0$ :  $min_L$  и  $min_R$  (рис. 2, б), при этом построение для неграничных значений  $D_0$ <sup>1</sup>: определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 min_L &= \min\{d_i | Z_{D_0}(d_i) \leq Z_{D_0}(d_j), d_i < d_j \leq D_0, \forall j\}; \\
 min_R &= \max\{d_i | Z_{D_0}(d_i) \leq Z_{D_0}(d_j), D_0 \leq d_j < d_i, \forall j\}; \\
 St_L &= \max\{d_i | d_i \leq (D_0 + min_L) \cdot C_L\}; \\
 St_R &= \min\{d_i | d_i \geq (D_0 + min_R) \cdot C_R\},
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $C_L + C_R \leq 1$ .

Рассмотрим также обобщение данного метода. При определении строга  $[St_L, St_R]$  будем учитывать не только значения ближайших к  $D_0$  локальных минимумов  $min_L$  и  $min_R$ , определенных в (2), но также и значения следующих ближайших максимумов  $max_L$  и  $max_R$ . Построение при этом может быть описано следующим образом:

<sup>1</sup> Если для  $D_0$  один из минимумов не определяется, то граница строга может быть вычислена как  $D_0 \cdot C$ , где  $C = 0,9$  для левого минимума и  $C = 1,15$  для правого минимума

$$\begin{aligned} \max_L &= \min\{d_i | Z_{D_0}(d_i) \geq Z_{D_0}(d_j), d_i < d_j \leq \min_L, \forall j\}; \\ \max_R &= \max\{d_i | Z_{D_0}(d_i) \geq Z_{D_0}(d_j), d_i > d_j \geq \min_R, \forall j\}; \\ St_L &= \max\{d_i | Z_{D_0}(d_i) \leq Z_{D_0}(D_0) - k_L \cdot |Z_{D_0}(D_0) - Z_{D_0}(\min_L)|, d_i \leq D_0\}; \\ St_R &= \min\{d_i | Z_{D_0}(d_i) \leq Z_{D_0}(D_0) - k_L \cdot |Z_{D_0}(D_0) - Z_{D_0}(\min_R)|, d_i \geq D_0\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $k_L = \frac{|D_0 - \min_L|}{|D_0 - \max_L|}$ ,  $k_R = \frac{|D_0 - \min_R|}{|D_0 - \max_R|}$ .

Если значения максимумов  $\max_L$  или  $\max_R$  не определены (граничное положение), то соответствующая граница строга может быть определена предыдущим методом по формулам (2).

Отметим, что этот метод в сравнении с предыдущим позволяет определять границы строга, учитывая соображения пропорциональности между ближайшими максимумами: если отклик характеристики направленности для центрального максимума превосходит соответствующие значения для ближайших боковых максимумов, то строг, определяемый этим методом, будет более узкий, а в противном случае — более широкий, что в свою очередь снижает вероятность ошибки 2 рода (рис. 2, в).

Приведем еще один метод определения строга (проиллюстрирован на рис. 2, з), который позволяет учитывать характер изменения отклика между значением  $D_0$  и ближайшими минимумами  $\min_L$  и  $\min_R$ , которые будем определять в соответствии с (2):

$$\begin{aligned} St_L &= \max\left\{d_i \left| \sum_{j=\min_L}^{i-1} \frac{|Z_{D_0}(d_j) + Z_{D_0}(d_{j+1})|}{2} - Z_{D_0}(d_i) \right| \leq \sum_{j=i}^{n-1} \frac{|Z_{D_0}(d_j) + Z_{D_0}(d_{j+1})|}{2} - Z_{D_0}(d_i), d_i \leq D_0 \right\}; \\ St_R &= \min\left\{d_i \left| \sum_{j=n}^{i-1} \frac{|Z_{D_0}(d_j) + Z_{D_0}(d_{j+1})|}{2} - Z_{D_0}(d_i) \right| \geq \sum_{j=i}^{\min_R-1} \frac{|Z_{D_0}(d_j) + Z_{D_0}(d_{j+1})|}{2} - Z_{D_0}(d_i), d_i \geq D_0 \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для сравнительного анализа методов выбора строга были рассмотрены дистанции  $D_0$  равные 0,5; 3 и 8 км. Для каждой дистанции  $D_0$  было проведено математическое моделирование по нижеприведенному алгоритму.

1) Для каждой из рассматриваемых дистанций при сильном значении «сигнал-помеха»  $\delta = 5$  и времени накопления  $T = 1$  с был получен массив значений  $Z_{D_0}(d_i)$ , где  $d_i$  пробегает все значения дистанций с шагом один процент, и были вычислены границы строгов каждым из выше предложенных методов. Результаты вычислений границ строга  $[St_L, St_R]$  для дистанций  $D_0$  каждым из четырех методов представлены табл. 1.

Таблица 1

Границы строгов (расстояние в метрах)

| $D_0$ | Метод № 1     | Метод № 2     | Метод № 3    | Метод № 4     |
|-------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 500   | [473, 523]    | [455, 556]    | [450, 545]   | [455, 556]    |
| 1000  | [904, 1115]   | [852, 1269]   | [827, 1172]  | [843, 1244]   |
| 3000  | [2328, 4188]  | [2045, 5533]  | [1815, 3016] | [1985, 6819]  |
| 5000  | [3364, 9660]  | [2956, 10052] | [2351, 5059] | [2757, 10052] |
| 8000  | [4534, 20172] | [3984, 17203] | [2785, 8076] | [3571, 13150] |

2) Для каждой из рассматриваемых дистанций при допустимом малом значении «сигнал-помеха»  $\delta = 0,6^2$  была проведена серия из  $n = 100$  испытаний и для полученной последовательности значений абсолютного максимума отклика  $\{M_{D_0}^i[\delta]\}_{i=1}^n$  вычислена вероятность непопадания в строг — вероятность ошибки первого рода.

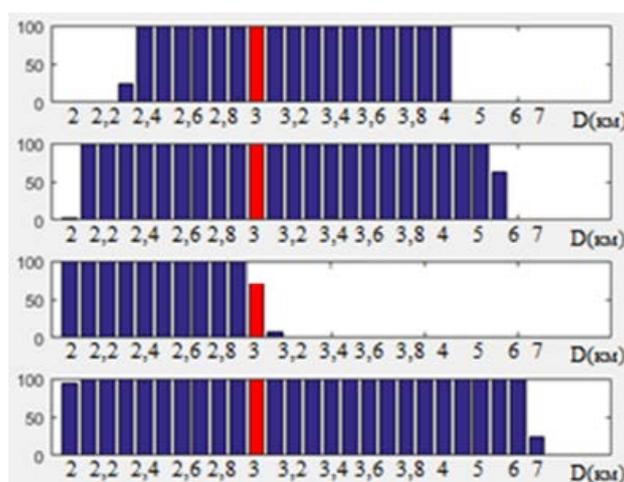
<sup>2</sup> Определялось исходя из того, что среднее квадратичное отклонение и смещение абсолютных максимумов откликов системы  $M_{D_0}^i[\delta]$  не должны превышать значения  $\alpha = 0,15$

3) Также были проведены исследования с целью обнаружения попадания в строб значений абсолютных максимумов отклика системы для положения целей, отличающихся от истинного  $D_0$ . В качестве ложных положений цели выбирались дистанции с переменным шагом, при этом шаг выбора соответствовал следующему правилу:

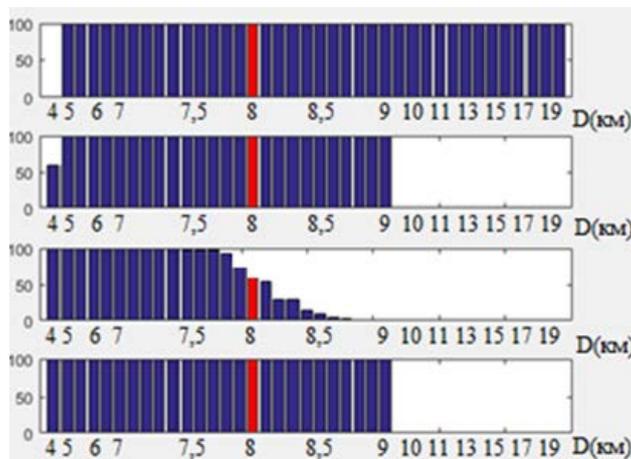
$$sh = \begin{cases} d_{i+1} - d_i = 100, & \text{если } \min(|d_i - D_0|, |d_{i+1} - D_0|) \leq 1000; \\ d_{i+1} - d_i = 500, & \text{если } 1000 < \min(|d_i - D_0|, |d_{i+1} - D_0|) \leq 3000; \\ d_{i+1} - d_i = 1000, & \text{если } \min(|d_i - D_0|, |d_{i+1} - D_0|) > 3000. \end{cases} \quad (5)$$

Далее для каждого значения ложной дистанций  $D_j$  была проведена серия из  $n = 100$  испытаний, для каждой серии найдена последовательность абсолютных максимумов  $\{M_{D_j}^i\}_{i=1}^n$  и вычислены вероятности попадания максимумов в строб для дистанции  $D_0$  — вероятности ошибок второго рода.

По результатам моделирования выяснилось, что для близкой дистанции (500 м) при всех рассматриваемых методах оценки ошибок первого и второго рода равны 0. Сравнительный анализ методов определения строга для ситуаций, когда в качестве истинной дистанции рассматривается средняя и дальняя дистанции, представлен на рис. 3. При этом вероятность ошибки первого рода для третьего метода получилась равной 0,6 и 0,56 соответственно для дистанций в 3 и 8 км, а при других методах — нулевая.



а



б

Рис. 3. Число попаданий в строб для дистанции 3 км (а) и 8 км (б).

Из исследования предложенных методов определения строга можно сделать следующие выводы: первый способ уместно применять только на близких и средних дистанций, второй и четвертый способы эквиваленты, способ 3 требует доработки – подбора констант, которые бы учитывали поведение характеристики направленности в левой и правой окрестностях точки экстремума.

***Литература***

1. [https://cyberlinka.ru/article/n/vybor-vida-i-parametrov-strobov-pri-otozhdestvlenii-koordinatnoy-informatsii-ot-sredstv-obnarusheniya-vozdushnyh-tseley-v-komplekse/viwer\\_](https://cyberlinka.ru/article/n/vybor-vida-i-parametrov-strobov-pri-otozhdestvlenii-koordinatnoy-informatsii-ot-sredstv-obnarusheniya-vozdushnyh-tseley-v-komplekse/viwer_)
2. Зябиров Э. В., Аравин А. В., Михайлов С. В., Филлюшкин И. П. Выбор вида и параметров стробов при отождествлении координатной информации от средств обнаружения воздушных целей в комплексе средств автоматизации батарейного командного пункта // Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион. 2018. С. 88–95.
3. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации // Сов. радио. 1974. 433 с.
4. Гампер Л. Е. Оптимальная пространственно-временная обработка в системах пассивной гидролокации с разнесенными антеннами // Науч.-техн. сб. «Гидроакустика». 2009. Вып. 10. 433 с.
5. Гампер Л. Е. Пассивная гидролокация источников шаумоизлучения с применением бортовых протяженных фокусирующих приемных систем // Тр. XIV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2018. С. 40–42.

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ, ОБНАРУЖИВАЕМЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ СРЕДСТВОМ

С. Н. Потычев<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. В. Суслин<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

## APPLICATION OF DEEP NEURAL NETWORKS FOR SOLVING PROBLEMS OF CLASSIFICATION OF OBJECTS DETECTED BY SONAR MEAN

S. N. Potapchev<sup>1</sup>, Ph.D., A. V. Suslin<sup>2</sup>, Ph.D.

<sup>1</sup>JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia

*Задача классификации морского объекта, обнаруживаемого гидроакустическими средствами, является сложной и ресурсоёмкой, с точки зрения её алгоритмической реализации. Бурное развитие современных технологий искусственного интеллекта, в частности программных решений на основе глубоких нейронных сетей, создает качественно новую технологическую основу для эффективного решения указанной задачи. Статья посвящена анализу путей применения нейросетевых решений при классификации морских объектов, обнаруживаемых гидроакустическим комплексом в процессе проведения поиска.*

*Classification of marine object detected by sonar means is a difficult and resource-intensive problem in view of its algorithm-based implementation. Rapid development of modern technologies of artificial intelligence specifically software solutions based on deep neural networks creates new technological basis for effective solution of specified problem. The paper is devoted to the analysis of the ways of application of neural network solutions at classification of marine objects detected by integrated sonar system during surveying.*

В современных условиях скоротечности процессов взаимодействия кораблей ВМФ с обнаруживаемыми морскими объектами скорость решения задач классификации таких объектов становится определяющим фактором эффективности практически любой системы освещения подводной обстановки (системы подводного наблюдения). Современные нейросетевые программные решения создают принципиально новый пласт возможностей для сокращения времени выработки решений о классификации морских объектов, обнаруживаемых в процессе поиска. Задача классификации морского объекта, обнаруживаемого гидроакустическими средствами, решается за счет создания на базе глубокой нейронной сети (ГНС) матрицы классификационных признаков, выявляемых в основных трактах гидроакустического комплекса (ГАК) или средства, и обладающих наибольшей информативностью. Достижимый технический результат заключается в определении весовых коэффициентов классификационных признаков на основе частоты их появления для различных классов целей. Высокая эффективность данного ГНС-решения может давать возможность с минимальными временными затратами и высокой точностью определить все основные классы морских объектов (целей): залп торпедного оружия, мина, боевой пловец, старт ракетного оружия, взрыв, подводная лодка или её имитатор, прибор гидроакустического подавления, шум биологического характера, рыболовный траулер, транспорт, военный надводный корабль, вертолёт или самолёт, групповая цель, айсберг, подводное навигационное препятствие и пр.

В настоящее время для решения этой задачи наибольшее распространение получил способ частотно-временной обработки сигнала, принятого антенной ГАК. Этот способ содержит следующие операции:

- прием гидроакустического шумового сигнала с помощью сформированных характеристик направленности антенны;
- частотно-временная обработка сигнала, включающая формирование частотных диапазонов, детектирование, временное осреднение;
- индикация на экране трассы сигналов шумящего объекта в каждом частотном диапазоне.

Способ обеспечивает возможность одновременного обнаружения, классификации и определения дистанции до шумящего объекта. Для решения задачи классификации в способ получения информации о шумящем объекте, содержащий прием гидроакустического шумового сигнала, частотно-временную обработку сигнала с формированием частотных диапазонов, детектирование и осреднение сигналов в частотных диапазонах, индикацию трассы сигналов в каждом частотном диапазоне, введены следующие действия:

- перед индикацией сигнал каждого частотного диапазона кодируют своим цветом, при этом яркость каждой цветовой компоненты определяется уровнем сигнала в соответствующем частотном диапазоне, а соединение цветовых компонент в цветное представление производят, например, так же, как на экране цветного кинескопа;

- производят индикацию цветового изображения сигнала шумящего объекта во времени, при этом результирующий цвет в каждой точке экрана при индикации определяется соотношением уровней сигнала в частотных диапазонах (индикаторная трасса цели);

- определение класса шумящего объекта и оценка дистанции до него путем сопоставления цвета индикаторной трассы сигнала объекта с цветовыми шкалами шумящих объектов разных классов по дистанции.

Недостатками данного способа является использование для классификации данных только от одного тракта ГАК, игнорируя информацию от других его трактов и системы контроля помех. При этом, как правило, используются всего два классификационных признака – частотный диапазон и отношение сигнала к помехе, игнорируя такие классификационные признаки, как протяжённость цели, величина изменения пеленга, устойчивость автоматического сопровождения цели, количества углов характеристики направленности, где наблюдается цель.

Таким образом, в данном способе классификация в общем случае производится по двум классам — сильно шумящий объект и слабо шумящий объект, что не даёт достоверной картины оператору гидроакустического комплекса о надводной, подводной и воздушной обстановке.

Также известен способ, распознавания (классификации) морских объектов, т.е. определение класса шумящего объекта, основанный на формировании признаков описаний сигналов с использованием особенностей спектрального состава шумоизлучения объектов различных классов с представлением оператору результатов различных видов статистического анализа данных принятого сигнала в различных частотных диапазонах гидроакустических станций. Этот способ заключается в следующем: система распознавания (классификации) основывается на использовании оператором-гидроакустиком в процессе принятия решения об анализируемом объекте результатов распознавания автоматической системы. Для формирования признаков описаний гидроакустических сигналов используются такие методы измерения и анализа случайных процессов, как спектральный, корреляционный, статистический, взаимокорреляционный, взаимоспектральный. Выбор признаков производят путём анализа всей информации в  $n$ -мерном пространстве признаков, из которого в другом пространстве получают минимизированное описание.

Бурное развитие современных технологий искусственного интеллекта, в частности программных решений на основе ГНС, создает качественно новую технологическую основу для эффективного решения указанной задачи. Как правило, во всех задачах классификации используется сочетание различных признаков, так как каждый в отдельности не обеспечивает требуемой вероятности правильного распознавания целей. Процесс классификации целей использует информацию как от систем первичной и вторичной обработки, так и собственные данные от устройств для выделения необходимых признаков. В процессе классификации необходимо выбрать те признаки, которые обладают большей информативностью. Количество используемых признаков определяется вероятностью правильной классификации.

Классификационные признаки могут принимать различные значения. Исходя из опыта эксплуатации гидроакустических комплексов [10, 11], данные значения можно разбить на четыре диапазона для каждого классификационного признака. Для удобства применения в цифровой обработке они формализуются их цифровыми значениями от 0 до 3. Для определения весовых коэффициентов классификационных признаков морских целей необходимо определить частоту использования каждого значения классификационных признаков. Чем реже встречается значение признака, тем выше точность классификации и тем соответственно выше весовой коэффициент.

Расчет весовых коэффициентов для первоначальной настройки ГНС осуществляется в следующей последовательности:

1. Определяются все факторы, для которых нужно определить весовой коэффициент.
2. Каждому фактору присваивается определенный ранг в зависимости от степени значимости фактора.
3. Суммируются ранговые значения всех факторов.
4. Ранг каждого фактора делится на сумму всех ранговых значений.

Факторами, для которых нужно определить весовой коэффициент, являются классификационными признаками обнаруживаемых объектов (целей). Как уже было сказано ранее — чем реже встречается значение признака, тем выше достоверность классификации и тем соответственно выше ранг значимости фактора. Приняв за ранг значимости дисперсию частоты встречаемости классификационного признака, можно утверждать, что чем выше дисперсия частоты встречаемости классификационного признака, тем выше ранг значимости, тем точнее классификация, то есть:

$$D(x_i) = \frac{(x_i - \bar{X}_i)^2}{n}, \quad (1)$$

где  $D(x_i)$  — дисперсия частоты встречаемости  $i$ -го классификационного признака;  $X_i$  — частота использования варианта значения  $i$ -го классификационного признака;  $\bar{X}_i$  — математическое ожидание частоты использования варианта значения  $i$ -го классификационного признака;  $n$  — количество вариантов значений классификационного признака. Тогда весовой коэффициент  $i$ -го классификационного признака будет равен

$$k_i = \frac{D(x_i)}{\sum D(x)}. \quad (2)$$

Присвоение дискретному значению классификационного признака весового коэффициента позволяет решать неоднозначность классификации при противоречивости выявленных классификационных признаков. Данные представленного ранжирования целесообразно использовать как в ГНС для автоматической, так и в нейросетях автоматизированной классификации шумов и сигналов морских целей. Этот факт предполагает следующую модель применения ГНС для решения задач классификации в ГАК: Информация об окружающей подводной, надводной и воздушной обстановке поступает с антенн гидроакустического комплекса на соответствующие тракты, в которых вырабатывается пространство классификационных признаков соответствующей мощности. Пространство классификационных признаков, представленное наборами данных о соответствии каждому из возможных вариантов значений признака за исключением варианта, когда данные по признаку отсутствуют попадают на первичный слой входов искусственной нейронной сети (в составе ГНС классификации). Значения на выходах ГНС, являются числами от 0 до 1, отражающими оценку искусственной нейронной сети соответствия между наборами данных о признаках, подаваемых на входы и классами целей представленных на выходах ГНС. Далее эти значения подаются на схему построения диаграммы значений классификационных признаков, где классы целей группируются согласно признакам второго порядка, для отображения цветовым кодом. Затем информация о классах цели подаётся на индикатор, где отображаются в виде соответствующей столбчатой диаграммы. При подготовке обучающих выборок для обучения искусственной нейронной сети, как правило, применяются априорные (ранее накопленные) частоты использования значений классификационных признаков. В качестве ГНС-искусственной нейронной сети используется многослойный неоконгитрон с обратными связями, с входным слоем, содержащим не менее 100–150 искусственных нейронов, не менее пяти скрытых слоев, содержащих до 300 искусственных нейронов, и выходным слоем, содержащим до 50 искусственных нейронов. Предварительный сравнительный анализ способа классификации морских объектов на основе весовых коэффициентов в ГНС и их классификационных признаков проведенный с использованием методов имитационного моделирования предлагаемых и традиционных способов классификации в ГАК показал, что предлагаемый подход имеет более точную классификацию, чем традиционные методы, а также меньшее время принятия решения.

*Литература*

1. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Пер. с англ. М.: Мир, 1992. 240 с., ил.
2. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / Под ред. Т. Кохонен. Пер. 3-го англ. изд. 2-е изд. (эл.). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 655 с., ил. [Электронный ресурс].
3. Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. М.: Финансы и статистика, 2004. 176 с.; ил.
4. Вакуленко С. А., Жихарева А. А. Практический курс по нейронным сетям. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 71 с.
5. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2018. 480 с.; ил.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / Пер.с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 2-е изд. 1104 с.; ил.
7. Goodfellow I., Bengia Y., Courville A. Deep Learning. London; Cambridge: MIT Press, 2016.
8. Аппаратное ускорение глубоких нейросетей: GPU, FPGA, ASIC, TPU, VPU, IPU, DPU, NPU, RPU, NNP и другие буквы. [Электронный ресурс]. <https://habr.com/ru/post/455353/> Дата обращения: 21.02.2020.
9. Мишель Н. Нейросети и глубокое обучение. [Электронный ресурс]. <https://habr.com/ru/post/458724/> Дата обращения: 21.02.2020.
10. Балахонов П. Н. Весовые коэффициенты классификационных признаков морских целей // Сб. «Межведомственная НТК». СПб.: ВМПИ, 2017. № 2(20) С. 299–304.
11. Потапычев С. Н., Ивакин Я. А. Использование геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений // Вест. СПбГУТиД «Естественные и технические науки». 2018. Серия 1. № 2. С. 24–32.

## ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ КЛАССИФИКАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Г. С. Малышкин, д-р техн. наук

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## ON A METHOD FOR CLASSIFYING HYDROACOUSTIC RADIATION SOURCES AT THE OUTPUT OF ADAPTIVE SPATIAL PROCESSING

G. S. Malyshkin, Dr.Sc.

JSC «Concern «CSRI «Elektroprigor», St. Petersburg, Russia

*Приводятся результаты морских экспериментов по анализу пеленгационных рельефов и траекторий с позиций классификации источников на надводные и подводные применительно к осенним гидроакустическим условиям в районе берегового клина. Показано, что в режиме шумопеленгования в качестве классификационного признака для разделения надводных и подводных источников может использоваться модуляция траекторий по направлению наблюдения, возникающая при распространении сигналов с учётом отражений от границ — поверхности моря и дна.*

*The results of marine experiments on the analysis of direction-finding reliefs and trajectories are presented from the point of view of the classification of sources into surface and underwater sources in relation to autumn hydroacoustic conditions in the area of the coastal wedge. It is shown that in passive listening mode, as a classification feature for separating surface and underwater sources, modulation of trajectories in the direction of observation, which occurs when signals propagate, taking into account reflections from the boundaries — the sea surface and the bottom, can be used.*

Специфической особенностью задачи классификации гидроакустических объектов является необходимость количественных оценок параметров сигналов, которые могут использоваться как классификационные признаки. Это обстоятельство предъявляет более жёсткие требования к средствам первичной обработки информации. Для обнаружения и измерения параметров сигналов при первичной обработке принятых сигналов в сложных многоцелевых помеховых ситуациях широко используются адаптивные алгоритмы [1–6], позволяющие улучшить разрешающую способность средств наблюдения.

Отметим класс быстрых проекционных алгоритмов [3–6], который показал высокую конкурентоспособность среди известных типов алгоритмов первичной обработки сигналов [5]. Алгоритм реализован в виде пространственного фильтра и имеет несколько достаточно простых вариантов реализации, обеспечивающих текущее обнаружение, определение направления, энергетических и других параметров принимаемых сигналов.

Особенность сложных помеховых ситуаций заключается в наличии одновременно в зоне обзора совокупности разнородных объектов с различными интенсивностями излучения и траекториями движения. В результате совместного воздействия формируется суммарный помеховый фон, каждый элемент которого является объектом наблюдения, с одной стороны, и источником помехи для остальных наблюдаемых объектов, с другой стороны.

В таких ситуациях особенно сложным становится наблюдение за объектами с минимальным уровнем шумоизлучения (при высокой приоритетности обнаружения таких объектов), поскольку даже вторичных маскирующих эффектов от интенсивных источников (рассеяние при распространении в среде, ограниченный интервал спектрального анализа и др.) достаточно для маскировки слабых сигналов. В связи с этим задача обнаружения и построения траекторий наиболее слабых сигналов требует разработки алгоритмов [5, 6], создающих благоприятные, приоритетные условия для решения этой задачи.

Предлагаемая работа является продолжением работы [5], однако с точки зрения — анализа пригодности экспериментально полученных более 25 траекторий источников сигналов для обеспечения их классификации на классы надводный или подводный источник. Напомним основные параметры натурального эксперимента, приведённые в [5]. Для эксперимента использовалась антенна из 56 вертикальных гирлянд (по 10 элементов каждая), эквидистантно разнесённых по горизонтали. Антенна установлена на глубине 200 м в прибрежной морской зоне

берегового клина вблизи судоходных трасс, в районе интенсивной хозяйственной деятельности.

Элементы гирлянд имеют кардиоидную характеристику направленности, максимум которой обращён в сторону открытого моря. Сигналы  $L=56$  таких гирлянд антенной системы подвергались цифровой регистрации. Обработка записей выполнялась в два этапа. На первом этапе производился спектральный анализ сигналов каждой гирлянды. При обработке формировался частотный диапазон со средней частотой 0,6758 (от проектной частоты антенны). Этот диапазон состоял из  $N=1173$  спектральных отсчётов, с относительной полосой каждого к проектной частоте  $0,56 \cdot 10^{-3}$ . Общая протяжённость анализируемого эпизода (длительностью два часа сорок минут) состояла из 4618 интервалов спектрального анализа. Общий частотный диапазон при обработке составлял величину от 0,35 до 1,0 от проектной частоты антенны, так что отношение верхней граничной частоты используемого диапазона к нижней составляло величину 2,86 (1,52 октавы). Волновой размер антенны на верхней границе диапазона равен 28, на средней частоте 18,92, и на нижней границе 10,8. В результате вычисления спектральных отсчётов на каждом интервале спектрального анализа (СА) формируется 1173 векторов столбцов  $\mathbf{X}(n, t)$  размерности  $L=56$  по числу элементов антенны (гирлянд), где  $n$  определяет номер спектрального отсчёта, а  $t$  дискретный номер интервала спектрального анализа по времени.

Быстрый проекционный алгоритм строился на использовании «коротких» выборок  $\mathbf{X}(r, \tau)$  размерности  $L \times K_0$  ( $L > K_0$ ), сформированной из  $K_0$  входных элементов  $\mathbf{X}(n, t)$  на временном интервале  $\tau$ , где  $r = \overline{1, R}$  номер адаптивной группы выборок по частоте, а  $\tau$  по времени. Из адаптивной выборки  $\mathbf{X}(r, \tau)$  формируется матрица размерности  $K_0 \times K_0$

$$R^{**}(r, \tau) = \mathbf{X}^*(r, \tau) \mathbf{X}(r, \tau) = \mathbf{Y}(r, \tau) \mathbf{\Lambda}(r, \tau) \mathbf{Y}^*(r, \tau), \quad (1)$$

где  $\mathbf{Y}(r, \tau)$  и  $\mathbf{\Lambda}(r, \tau)$  — матрица её собственных векторов и диагональная матрица собственных чисел, соответственно.

Вычисление пеленгационного рельефа производится с использованием соотношения

$$C_{jcor}^{\Sigma} = \frac{1}{T_a} \sum_{\tau=1}^{T_a} \left[ \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R Z_j^*(r) \mathbf{Y}(r, \tau) \mathbf{\Lambda}^{-1}(r, \tau) \mathbf{\Lambda}(r, \tau) \mathbf{Y}^*(r, \tau) Z_j(r) \right], \quad (2)$$

где  $Z_j(r) = \mathbf{X}^*(r, \tau) V_j(r)$  — вектор столбец сформированных неадаптивных пространственных каналов  $j = \overline{1, J}$ ;  $\mathbf{\Lambda}(r, \tau)$  — корректирующая матрица (размерности  $K_0 \times K_0$ ), которая определяет конкретную разновидность адаптивного алгоритма, например, ослабление наиболее сильных сигналов и выделение наиболее слабых;  $T_a$  количество пеленгационных рельефов по времени, используемых для увеличения времени усреднения итогового пеленгационного рельефа;  $j = \overline{1, J}$  номера пространственных каналов ( $J = 151$ ).

Рассмотрим структуру исходных собственных чисел и варианты их коррекции.

На рис. 1 кривой 1, в качестве примера, представлено (усреднённое по  $R=65$  частотным группам) исходное распределение собственных чисел на 118 м интервале спектрального анализа, что соответствует 59-му по времени пеленгационному рельефу. Общий пеленгационный рельеф формировался после дополнительного усреднения по времени восьми частных пеленгационных рельефов, так что использовался общий объём выборок из вектор-столбцов размерности 56 был равен  $38 \cdot 65 \cdot 8 = 19760$ .

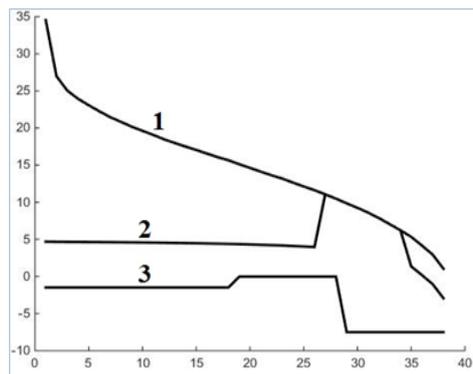


Рис. 1. Кривые.

Вариант использования весовых коэффициентов, заданных кривой 1, определяет неадаптивный исходный пеленгационный рельеф, главным недостатком которого является наличие мощных доминирующих отметок сильных сигналов, маскирующих слабые сигналы.

Кривая 2 характеризует состав собственных чисел после ограничения 26 старших собственных чисел, для алгоритма (2), обеспечивающего выделение слабых сигналов и максимальное ослабление наиболее сильных сигналов. Этот вариант обеспечивает в пеленгационном рельефе минимальный уровень наиболее сильных сигналов и полное использование наиболее слабых и рассеянных сигналов.

Кривая 3 характеризует распределение собственных чисел для пеленгационного рельефа, ориентированного на обнаружение и разрешение когерентных сигналов. Это достигается выравниванием 27 старших весовых коэффициентов между собой (при небольшом увеличении веса слабых когерентных сигналов) и ослаблением весовых коэффициентов самых слабых сигналов для устранения их мешающего действия на более сильные сигналы.

На рис. 2 представлены обзорные картины траекторий сигналов, полученные рассматриваемыми вариантами алгоритмов при дополнительном усреднении восьми смежных пеленгационных рельефов (время накопления 32 с).

Основная задача заключается в проверке надёжного обнаружения и классификации подводного источника в присутствии многочисленных надводных источников. Каждый рисунок представляет траектории, выделенные при обработке 2309 пеленгационных рельефов (уровень сигналов в дБ ось ординат) в диапазоне углов обзора, синус которых изменяется от  $-1$  до  $+1$  (ось абсцисс). В процессе формирования пеленгационных рельефов весь частотный диапазон разбивался на  $R = \frac{N}{K} = 65$  ( $r = \overline{1, R}$ ) адаптивных поддиапазонов, где  $N=1173$  — общее число

используемых далее в эксперименте спектральных отсчётов, а  $K$  - число спектральных отсчётов, используемых в одном частотном поддиапазоне при реализации адаптивных алгоритмов. Размерность векторов  $K_0$ , используемых для дальнейшей обработки, равна  $38$  ( $K_0 = KT_0 = 19 \cdot 2$ ) спектральных отсчётов. Вычисление частных пеленгационных рельефов проводилось для каждой частотной группы (из 19 спектральных отсчётов на двух временных интервалах) с последующим суммированием в общем пеленгационном рельефе. Решение об обнаружении сигналов и оценке текущих параметров обнаруженных сигналов принимается в результате обработки общего пеленгационного рельефа (сформированных из суммы сигналов 65 частотных групп) с использованием методов двустороннего пространственного контраста, подробно описанных в [13]. Пеленг на обнаруженный объект определялся в результате интерполяции выходного сигнала с использованием отметок трёх каналов, в окрестности обнаруженного сигнала.

Рис. 2, а построен с использованием неадаптивного алгоритма. При анализе траекторий, построенных этим алгоритмом, основная сложность заключается в необходимости реализации их высокой чувствительности (для обнаружения самых слабых сигналов) и большим динамическим диапазоном входных воздействий от наиболее сильных источников. В результате малые вариации уровня сильных сигналов достигают порога срабатывания, и траектории сильных сигналов оказываются размытыми и эти отметки затемняют фон, на котором наблюдаются отметки слабых сигналов. Сигнал подводного источника замаскирован многочисленными ложными отметками, а в поле наблюдения имеются большие области, в которых затруднительно выделение любых сигналов.

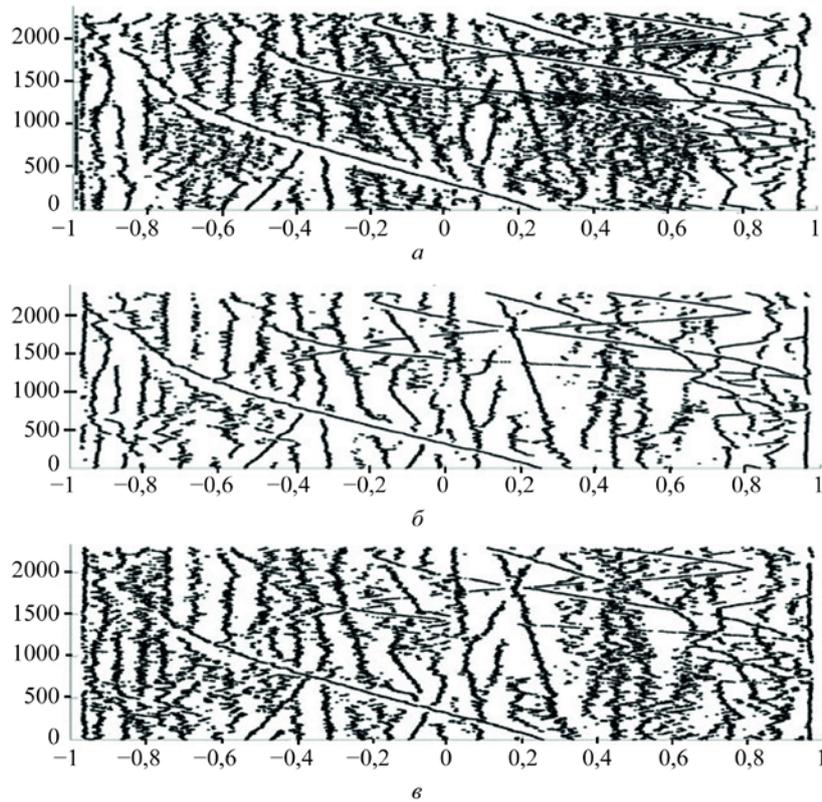


Рис. 2. Траектории сигналов.

*a* — неадаптивный алгоритм; *б* — алгоритм, выделяющий когерентные сигналы;  
*в* — алгоритм, выделяющий слабые и рассеянные сигналы.

Рис. 2, *б* построен на основе алгоритма (2), оптимизированного для обнаружения когерентных сигналов с ограничением мощности сильных сигналов. В результате траектории сигналов носят более локальный характер и лучше разделяются между собой. Отчётливо виден подводный источник, начинающийся при синусе угла  $-0,1$  и заканчивающийся при значении синуса  $\sim 0,25$ , однако количество выделенных элементов траектории этого источника не полно отображает его особенности. Значительно сократились участки поля наблюдения с трудно различимыми траекториями отдельных источников.

На рис. 2, *в* представлены траектории, выделенные алгоритмом для обнаружения слабых и рассеянных сигналов, в соответствии с кривой 2 рис. 1. Главная особенность этого варианта траекторий — значительно более полная траектория подводного источника.

На рис. 3 приведена полная картина траекторий всех источников рассматриваемого эпизода, при этом все сигналы одновременно выделяются двумя рассмотренными алгоритмами. В рассматриваемом эпизоде присутствует сигнал одного подводного источника, отмеченный красной линией, а все остальные источники — различные варианты надводных судов и катеров, случайно оказавшиеся в зоне наблюдения антенны.

Рассматриваемые классификационные признаки используют расширение пространственного спектра сигнала при его распространении с переотражениями от поверхности и дна.

Количественный анализ результатов данного эпизода наблюдения показывает, что сигналы надводных источников при дистанциях до антенны более 3 км распространяются с отражениями от поверхности и дна, ширина их пространственного спектра больше  $\sim 0,4$  градуса и может превышать несколько (до 2–3) градусов.

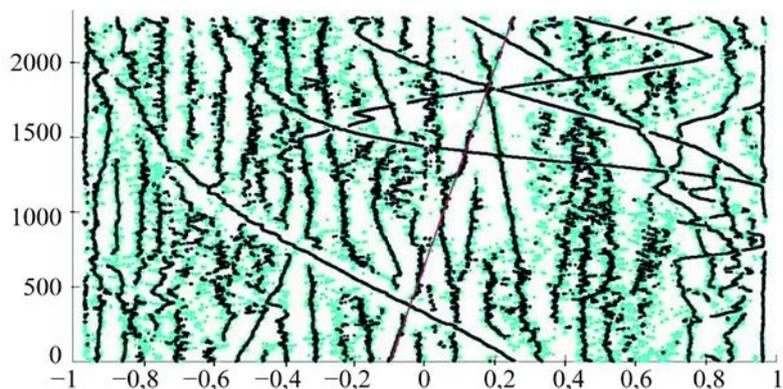


Рис. 3. Траектории эпизода, при совместном использовании алгоритмов, когерентного и для обнаружения слабых и рассеянных сигналов.

Сигналы подводного источника и ближних надводных источников (расстояние меньше 3 км) распространяются к антенне без отражений от поверхности и дна и имеют ширину пространственного спектра меньше 0,3–0,4 градуса. Надводные источники с узким пространственным спектром легко распознаются по другим классификационным признакам — скорость изменения пеленга и отношение сигнал/помеха.

#### *Литература*

1. Capon J. High resolution frequency–wavenumber spectral analysis // Proc.IEEE. 1969. V. 57. P. 1408–1418.
2. Schmidt R. O. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Trans. 1986. V.AP\_34. № 3. P. 276–280.
3. Ратынский М. В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2004, 199 с.
4. Черемисин О. П., Ратынский М. В., Комов А. А., Пушин А. Е. Эффективный проекционный алгоритм адаптивной пространственной фильтрации // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39, № 2. С.259–263.
5. Малышкин Г. С. Экспериментальная проверка эффективности быстрых проекционных адаптивных алгоритмов // Акуст. жур. 2019. Т. 65, № 6. С. 828–847.
6. Малышкин Г. С. Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов // Акуст. жур. 2017. Т. 63, № 2. С. 196–208.
7. Лаваль Р., Лабаск И. Влияние неоднородностей и нестабильностей среды на пространственно-временную обработку сигналов // Подводная акустика и обработка сигналов. М.: Мир, 1985. С. 43–68.
8. Малеханов А. И. Некогерентная пространственная фильтрация мод в случайно неоднородном океаническом волноводе // Акуст. жур. 1992. Т. 38, № 5. С. 898–904.
9. Завольский Н. А., Малеханов А. И., Раевский М. А., Смирнов А. В. Влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны в условиях мелкого моря // Акуст. жур. 2017. Т. 63, № 6. С. 501–512.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-08-00130.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАДРОВ ОТОБРАЖЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ

А. М. Инюкина<sup>1</sup>, Е. Л. Шейнман<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF AUTOMATING THE DESIGN OF DISPLAYING FRAMES OF SONAR SURVEILLANCE EQUIPMENT

A. M. Inyukina<sup>1</sup>, E. L. Sheinman<sup>1,2</sup>, Dr.Sc.

<sup>1</sup>JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Russia

*Обсуждается подход к формированию кадров отображения и управления гидроакустических средств подводного наблюдения, основанный на унификации структуры и фрагментов кадров отображения и табло управления, с предоставлением возможности разработчику кадра менять индицируемую информацию, размеры и параметры проектируемых фрагментов кадра отображения. Область применимости такого подхода — системы моделирования, направленные на проектирование гидроакустических средств наблюдения, отображение и управление их работой.*

*An approach to the formation of frames for displaying and controlling hydroacoustic underwater surveillance means is discussed based on the unification of the structure and fragments of frames for display and control panel, with the possibility for the frame developer to change the displayed information, sizes and parameters of the projected fragments of the display frame. The area of applicability of this approach is modeling systems aimed at designing hydroacoustic surveillance means, displaying and controlling of their operation.*

В настоящее время резко возросли требования, предъявляемые к современным гидроакустическим средствам наблюдения, что обуславливает необходимость сравнительного анализа большого числа различных технических решений и повышение уровня автоматизации при проектировании сложных систем.

С учетом этого актуальными становятся задачи разработки системы автоматизации проектирования и оценки эффективности гидроакустических средств подводного наблюдения [1, 2], что позволит проводить анализ существующих и новых технических решений методами математического моделирования, что позволит сократить количество циклов разработки, производства и испытаний опытных образцов изделия.

Основным требованием, которое предъявляется к такой системе, является универсальность, то есть, возможность анализировать и оценивать эффективность различных решающих алгоритмов, заданных разработчиком. Она должна обеспечивать возможность оперативного изменения алгоритмов обработки и принятия решения, сравнительную оценку эффективности различных вариантов алгоритмов и выбор наилучших из них.

Учитывая высокую значимость работы оператора в гидроакустических системах наблюдения, одной из задач, которые должны решаться в такой системе, является формирование и совершенствование кадров отображения информации и управления.

При этом требования к методам индикации информации и управления в такой системе аналогичны требованиям, перечисленным выше. Оператор должен иметь возможность в диалоговом режиме [3] формировать и перестраивать формируемый кадр отображения.

В настоящее время в таких программных системах, как MATLAB, SIMULINK для визуализации широко используется машинная графика двух типов [4]: обычная двумерная и трехмерная растровая графика и специальная дескрипторная (handle) графика. Большинство команд высокоуровневой графики, ориентированной на конечного пользователя, автоматически устанавливают свойства графических объектов и обеспечивают воспроизведение графики в нужной системе координат, палитре цветов, масштабе и т.д. Дескрипторная графика позволяет осуществлять визуальное программирование объектов пользовательского интерфейса — управляющих кнопок, текстовых панелей и т.д. Применение графики в MATLAB практически исключает необходимость в сложных математических вычислениях, обычно необходимых для

построения графиков. Это позволит оператору достаточно быстро формировать кадры отображения.

Разработчику кадра должна быть предоставлена возможность простого дополнения и корректировки вариантов индикации информации, без сложных переделок программного обеспечения. Для этого необходимо унифицировать структуру и фрагменты кадров отображения и табло управления, с предоставлением возможности разработчику менять индицируемую информацию, размеры, фон и параметры проектируемых фрагментов кадра отображения и собирать кадр из заранее заготовленных унифицированных фрагментов.

В ряде графических систем накоплен большой опыт индикации информации с использованием такого подхода. Например, при создании графического интерфейса оператора используется технология DAD (drag-and-drop). Такая технология предоставляет возможность не описывать каждый графический объект, помещаемый на интерфейс, а использовать готовые элементы, собранные в библиотеке.

В настоящем докладе предлагается использовать этот опыт для формирования кадров отображения информации в гидроакустике.

Анализ существующих кадров отображения гидроакустических систем показал, что кадры отображения отличаются размерами, фоном, используемой цветовой гаммой, размещением областей индикации информации, оперативного табло управления (ОТУ), справочной информации, и т.д.

Традиционно используется небольшой состав фрагментов индикации. Приведем основные из них:

- одномерная индикация информации, например, индикация отметок объектов, обнаруженных на разных пеленгах;
- двухмерный график — функциональная зависимость двух величин;
- «Водопад» — яркостная и цветовая индикация амплитуды сигнала или спектра, индицируемая на последний момент времени в верхней строке фрагмента, которая при приходе новой информации сдвигается на одну строку вниз;
- временная развертка сигнала — обычно используется для индикации информации режима ГЛ. Чаще всего — двумерный фрагмент кадра, заполняемый по мере прихода сигнала. Может индицироваться в декартовых или полярных системах координат;
- индикация объектов на фоне карты.

Примеры индикации приведены на рис. 1, 2.

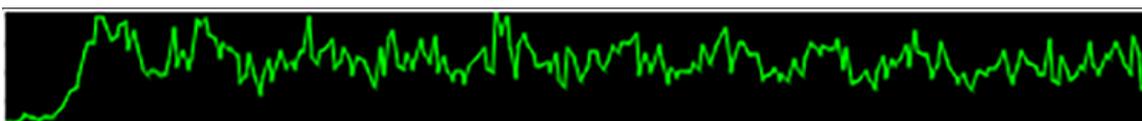


Рис. 1. Пример двухмерной индикации — амплитудная огибающая (зависимость амплитуды от частоты).

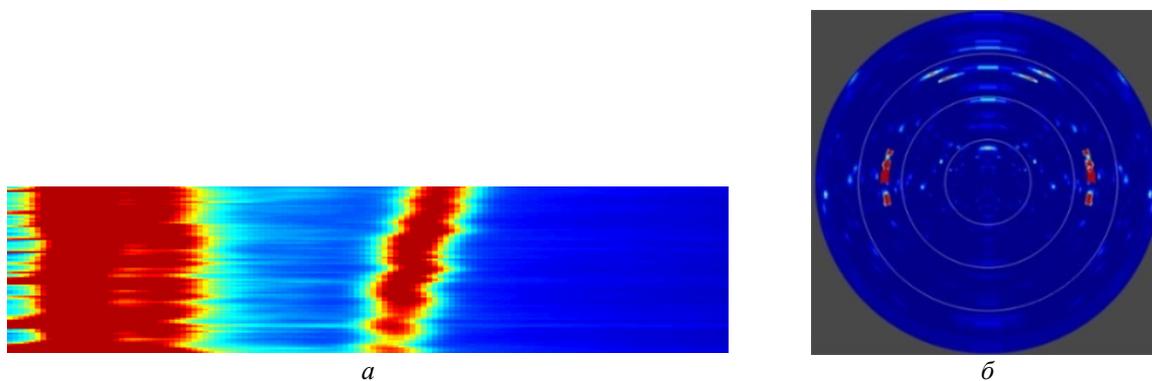


Рис. 2. Пример индикации фрагментов.

*a* — «Водопад»; *б* — круговой растр — представление временных разверток в яркостном виде в полярных координатах.



Рис. 3. Пример реализации фрагментов ОТУ.

*a* — включение процесса излучения; *b* — отключение процесса излучения; *v* — выбор уровня ослабления.



Рис. 4. Пример реализации фрагментов ОТУ.

*a* — поля ввода/вывода комплексного номера и класса объекта;  
*b* — реализация ползункового переключателя масштаба ДС.

Стоит перечислить вспомогательные графические элементы, которые используют при формировании кадров отображения и управления работой гидроакустических средств наблюдения: полимаркер (графическое отображение знака класса объекта (ПЦ, НЦ)); штрих (метки ДС); таблицы (формуляры объектов); символьные метки – набор табличек ограниченного размера, состоящего из символов, с возможностью изменения шрифта; уровень (регулировка усиления); шкала, состоящая из оси, рисок одинакового размера с равным шагом и цифровки всех или части рисок (шкала КУ).

Аналогично можно выделить общие фрагменты табло управления рис. 3, 4:

- таблицы;
- кнопки управления (с фиксацией и без фиксации);
- выпадающие списки;
- поля ввода/вывода информации;
- переключатели;
- индикаторы состояния и т.д.

Таким образом, видно, что индикация гидроакустических средств наблюдения может быть формализована и унифицирована относительно просто. Для этого надо сформировать библиотеку наиболее часто используемых вариантов индикации фрагментов и дать оператору возможность выбрать и подать информацию, циркулирующую в системе, на вход выбранных оператором фрагментов.

Особую сложность представляет трехмерная индикация (рис.5), так как для нее надо предусмотреть одновременно возможность выбора и формирования моделек, управление цветом, прозрачностью, возможность перемещения 3D сцены, масштабирования и вращения изображения. Однако и эта задача разрешима. Например, в программной системе MATLAB [5], построение трехмерных фигур происходит достаточно быстро. Кроме того, при построении таких графиков используется достаточно совершенный алгоритм удаления невидимых линий, что наряду с большими размерами графиков и возможностью интерполяции по цвету делает построенные трехмерные поверхности и фигуры весьма эстетичными и наглядными.

Следует отметить, что любая манипуляция с трехмерными визуальными объектами, например, скорость вращения, во многом зависит от скорости работы ПЭВМ, на которой установлена программная система, от видеокарты и её настроек.

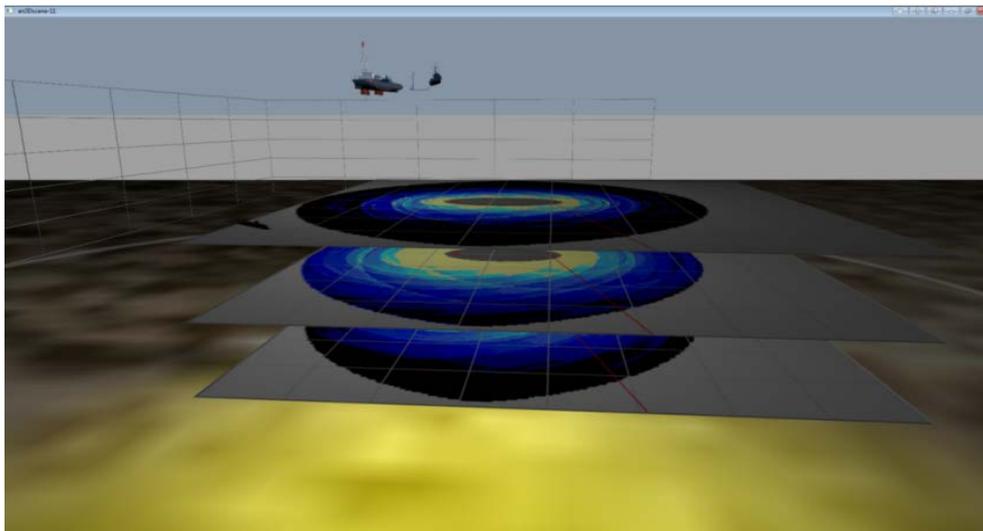


Рис. 5. Изображение 3D сцены с зонами контакта в виде плоскостей с текстурами зон для трёх глубин.

Таким образом, в настоящей работе показана возможность формирования кадров отображения и управления гидроакустических средств подводного наблюдения, основанная на унификации структуры и фрагментов кадров отображения и табло управления, с предоставлением возможности разработчику кадра менять индицируемую информацию, размеры и параметры проектируемых фрагментов кадра отображения.

Область применимости такого подхода — системы моделирования, направленные на проектирование гидроакустических средств наблюдения, отображение и управление их работой. Дополнительно такой подход позволит проверять и совершенствовать выполнимость эргономических требований для разных вариантов реализации индикации информации.

#### *Литература*

1. Шейнман Е. Л. Оценка эффективности многофункциональных систем обработки информации методами математического моделирования // Тр. V междунар. конф. по морским интеллектуальным технологиям. СПб.: Моринтех, 2003. 327 с.
2. Бурносенко А. А., Жданович Ч. И., Каминский Э. Методика использования САПР для исследования механических систем / Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический. Минск: БНТУ, 2004. 60 с.
3. ГОСТ 15971-90 Системы обработки информации. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1991. 6 с.
4. Дьяконов В. П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 82 с.
5. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 25 с.

## МЕТОДЫ ПАССИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ДАЛЬНИХ ЗОН АКУСТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЁННОСТИ

И. Е. Лободин<sup>1</sup>, д-р техн. наук, А. И. Машошин<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup>НИЦ РЭВ и ФИР ВМФ, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## METHODS OF PASSIVE DETERMINATION OF COORDINATES OF OBJECTS IN DISTANT ZONES OF ACOUSTIC ILLUMINATION

I. E. Lobodin<sup>1</sup>, Dr.Sc., A. I. Mashoshin<sup>2</sup>, Dr.Sc.

<sup>1</sup>Radio-electronic and information resources Naval Investigation center, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

*В работе обоснованы алгоритмы определения координат шумящих источников в пассивном режиме работы шумопеленгаторной станции в условиях дальних зон акустической освещённости (ДЗАО), которые наблюдаются в большинстве глубоководных районов Мирового океана. Алгоритмы базируются на установленной закономерности поведения угла в вертикальной плоскости прихода максимума энергии сигнала источника звука при нахождении его в ДЗАО.*

*Algorithms for determination of position of noise sources in passive mode of passive sonar in distant zones of acoustic illumination, are validated. These algorithms are observed in many deep-water areas of world Ocean. The algorithms are based on defined mechanism of angle behavior in vertical plane of maximum energy arrival of sound source signal in distant zones of acoustic illumination.*

**Введение.** Одной из актуальных практических задач гидроакустики является определение координат источника звука в пассивном режиме работы шумопеленгаторной станции (ШПС). Наибольшую остроту эта задача приобретает применительно к условиям дальних зон акустической освещённости (ДЗАО), поскольку условия ДЗАО наблюдаются в большинстве глубоководных районов Мирового океана [1–3].

Трудность определения координат источника в условиях ДЗАО объясняется тем, что известные пассивные методы определения дистанции, обзор которых приведён в [4], в этих условиях не обеспечивают нужной точности ввиду больших расстояний между источником и приёмником и малых отношений сигнал/помеха (ОСП), препятствующих измерению ряда информативных параметров сигнала, либо вообще не работоспособны.

В статье приводятся результаты разработки применительно к условиям ДЗАО специального метода пассивного определения координат источника.

**Постановка задачи.** Поскольку источник сигнала, находящийся в одной из ДЗАО, навигационной опасности для носителя ШПС не представляет, задача высокоточного определения координат каждого обнаруженного в ДЗАО источника сигнала в практическом плане не стоит. Актуальной является задача обнаружения и высокоточного определения координат конкретного источника сигнала либо источника сигнала определённого класса.

С точки зрения рассматриваемой задачи интерес представляют 2 класса источников сигнала:

- приповерхностные источники, излучающие сигнал высокой интенсивности;
- подводные источники, которые могут находиться в некотором известном интервале глубин и излучать сигнал низкой интенсивности.

При этом те и другие источники излучают широкополосные шумовые сигналы, параметры спектров которых лежат в известных достаточно узких пределах.

Приёмная антенна ШПС должна иметь вертикальный размер, обеспечивающий измерение угла прихода сигнала в вертикальной плоскости с предельной погрешностью не более 3°, и достаточный энергетический потенциал для обнаружения подводных источников в 1-й ДЗАО и приповерхностных источников – в 1-й и нескольких последующих ДЗАО.

Целью разрабатываемого метода является определение дистанции до приповерхностного источника и дистанции и глубины подводного источника.

**Обоснование метода.** Рассмотрение различных подходов к решению поставленной задачи привело к выводу, что решение следует искать в особенностях распространения акустического сигнала в условиях ДЗАО.

На основании этого вывода была теоретически и путём математического моделирования исследована лучевая структура сигнала источника на входе приёмной антенны в условиях ДЗАО. Теоретические исследования базировались на фундаментальных положениях распространения акустического сигнала в океаническом волноводе [1]. В качестве инструмента для моделирования была использована лучевая программа расчёта акустического поля источника, входящая в состав комплекса программ [5]. Результаты исследования кратко можно сформулировать следующим образом.

Для существования ДЗАО должны выполняться следующие условия [1]:

- глубина моря более 2 км;
- наличие подводного звукового канала (ПЗК);
- скорость звука на глубинах погружения источника и приёмника должна быть меньше скорости звука у дна;
- источник или приёмник должен находиться по глубине вне ПЗК.

Условия ДЗАО характеризуются чередованием зон акустической освещённости и зон акустической тени, привязанных к местоположению приёмника и движущихся вместе с ним. Первая зона акустической освещённости с протяжённостью в несколько километров, примыкающая к местоположению приёмника, носит название ближней зоны акустической освещённости, остальные зоны акустической освещённости называются ДЗАО и нумеруются. 1-я ДЗАО в зависимости от глубины залегания оси ПЗК и глубин источника и приёмника располагается на расстоянии от 40 км до 70 км от приёмника. Границы последующих ДЗАО кратно увеличиваются. В результате, начиная с некоторого номера, ДЗАО сливаются, образуя сплошную акустическую освещённость. Отдельные ДЗАО могут расщепляться на две.

В результате проведённого исследования были установлены следующие закономерности.

1. Уровень сигнала подводного источника на входе приёмника в условиях ДЗАО, кроме всего прочего, зависит от соотношения глубин источника и приёмника. При этом уровень максимален при равенстве этих глубин.

2. При нахождении источника в любой ДЗАО на вход приёмной антенны ШПС приходит 2 группы сигнальных лучей, одна из которых имеет положительные углы скольжения, другая — отрицательные. При глубине приёмника, превышающей глубину источника на большей части ДЗАО наибольшую энергию сигнала на входе приёмника, несут лучи с положительными углами скольжения. Но что особенно важно, при входе источника в ДЗАО путём пересечения её ближней границы максимум энергии её сигнала приходит на антенну по лучам с отрицательными углами скольжения, а при входе источника в ДЗАО путём пересечения её дальней границы — по лучам с положительными углами скольжения.

3. Расстояния от приёмника до границ каждой ДЗАО, а также до точки внутри каждой ДЗАО, в которой угол в вертикальной плоскости прихода максимума энергии сигнала изменяет знак на противоположный, поддаются достаточно точному расчёту с использованием лучевой программы расчёта поля акустического источника. Для этого надо знать ВРСЗ и глубины источника и приёмника. Для повышения точности расчёта лучевая программа расчёта поля акустического источника должна учитывать кривизну Земли [10].

**Алгоритм определения координат.** Установленные закономерности могут быть положены в основу алгоритма определения координат источника, применимого в условиях ДЗАО.

Допустим, что в условиях ДЗАО обнаружен источник, представляющий интерес и известными методами классификации [6] определён его класс — приповерхностный либо подводный. Если источник приповерхностный алгоритм определения дистанции до него имеет следующий вид:

- 1) заблаговременно измеряется ВРСЗ;
- 2) зная ВРСЗ и глубину носителя ШПС, с использованием лучевой программы расчёта поля сигнала источника в диапазоне возможных расстояний между источником и приёмником рассчитываются:

- расстояния от приёмника до ближней  $R_{min/i}$  и дальней  $R_{max/i}$  границ каждой  $i$ -й ДЗАО;
- расстояние  $R_{0/i}$  от приёмника до точки в пределах каждой  $i$ -й ДЗАО, на которой угол скольжения наиболее интенсивного луча сигнала источника изменяет знак на противоположный;
- зависимость от частоты и дистанции в пределах каждой  $i$ -й ДЗАО суммарной аномалии распространения лучей  $A_i(f, R)$ , попадающих в раскрыв характеристики направленности приёмной антенны, ориентированной на наиболее интенсивный луч;

3) в момент обнаружения сигнала источника на выходе приёмного тракта ШПС измеряются:

- угол в вертикальной плоскости прихода максимума энергии сигнала  $\hat{\psi}_0$ ;
- приведённый ко входу антенны уровень сигнала  $\hat{W}_0$  на выходе характеристики направленности приёмной антенны, ориентированной в направлении  $\hat{\psi}_0$ ;

4) определяется номер  $m$  ДЗАО, в которой находится источник. Это достигается путём расчёта энергетическим методом предполагаемой дистанции  $\hat{R}_1$  до источника и сравнением её с рассчитанными границами различных ДЗАО. В качестве ДЗАО, в которой находится источник, принимается ДЗАО с номером  $m$ , которая удовлетворяет условиям:

$$R_{min/m} \leq \hat{R}_1 \leq R_{max/m}; \quad (1)$$

5) определяется дистанция до источника  $\hat{R}_2$  на момент её обнаружения как расстояние до границы ДЗАО, через которую источник вошёл в ДЗАО:

$$\hat{R}_2 = \begin{cases} R_{min/m}, & \text{если } \hat{\phi}_0 < 0 \\ R_{max/m}, & \text{если } \hat{\phi}_0 > 0 \end{cases}. \quad (2)$$

Смысл формулы (2) заключается в том, что, если в момент обнаружения источника угол в вертикальной плоскости прихода максимума энергии сигнала отрицательный, то источник находится на ближней границе ДЗАО, и дистанция до неё равна рассчитанному расстоянию до ближней границы  $m$ -й ДЗАО. Если же этот угол положительный, источник находится на дальней границе ДЗАО, и дистанция до неё равна рассчитанному расстоянию до дальней границы  $m$ -й ДЗАО. Предельная погрешность оценки дистанции  $\hat{R}_2$  определяется точностью расчёта расстояний до границ ДЗАО, которая зависит от точности измерения ВРСЗ и неоднородности ВРСЗ на трассе между источником и приёмником. Расчёты показывают, что при предельной погрешности измерения скорости звука 0,5 м/с, реализуемой современными высокоточными средствами измерения [8], и возможных флуктуаций ВРСЗ под воздействием различных факторов предельная погрешность оценки дистанции  $\hat{R}_2$  составляет в среднем 5 % от истинной дистанции до источника.

Для повышения точности оценки дистанции до источника организуется наблюдение за сигналом источника в интересах выявления момента времени  $t_0$ , в который знак угла в вертикальной плоскости прихода максимума энергии сигнала изменился на противоположный. Дистанция до источника в этот момент времени  $\hat{R}_3$  оценивается как рассчитанное расстояние  $R_{0/m}$ . Точность оценки  $\hat{R}_3$  зависит от тех же факторов, что и точность оценки  $\hat{R}_2$ , но более устойчива к их влиянию. Проведённое моделирование показало, что предельная погрешность

оценки  $\hat{R}_3$  не превышает 2 % от истинной дистанции. Определение координат (дистанции и глубины) подводного источника осуществляется следующим образом:

- 1) заблаговременно измеряется ВРСЗ;
- 2) поскольку подводный источник не может обнаруживаться дальше 1-й ДЗАО, определяется, находится он в ближней или в 1-й ДЗАО. Это достигается с использованием известных методов определения дистанции, например, энергетического, спектрального, по скорости изменения пеленга. Если установлено, что источник находится в ближней зоне акустической освещённости, выполняется выход из алгоритма;
- 3) путём изменения глубины носителя ШПС в пределах возможного диапазона глубин источника определяется глубина, на которой уровень сигнала источника на выходе приёмного тракта максимален. Эта глубина принимается за глубину источника  $\hat{H}_{ist}$ ;
- 4) носитель ШПС погружается на глубину, максимально превышающую глубину источника  $\hat{H}_{ist}$ ;
- 5) зная ВРСЗ и глубины источника и носителя ШПС, с использованием лучевой программы расчёта поля сигнала источника рассчитываются:
  - расстояния от приёмника до ближней  $R_{min/1}$  и дальней  $R_{max/1}$  границ 1-й ДЗАО;
  - расстояние от приёмника до точки в пределах 1-й ДЗАО  $R_{0/1}$ , на которой угол скольжения наиболее интенсивного луча сигнала источника изменяет знак на противоположный;
- 6) на выходе приёмного тракта ШПС измеряется угол в вертикальной плоскости прихода максимума энергии сигнала  $\hat{\psi}_1$ ;
- 7) по формуле (2) при  $m=1$  определяется дистанция до источника  $\hat{R}_2$  как расстояние до границы ДЗАО, через которую источник вошёл в ДЗАО.

Для повышения точности оценки дистанции до источника организуется наблюдение за сигналом источника в интересах выявления момента времени  $t_0$ , в который знак угла в вертикальной плоскости прихода максимума энергии сигнала изменился на противоположный. В качестве дистанции до источника в этот момент времени  $\hat{R}_3$  принимается рассчитанное расстояние  $R_{0/1}$ . Проведенное моделирование показало, что в случае подводного источника вследствие наличия погрешности в определении его глубины предельная погрешность оценки дистанции  $\hat{R}_2$  составляет в среднем 7–8 %, а дистанции  $\hat{R}_3$  — 3–4 %.

**Заключение.** Одной из актуальных практических задач гидроакустики является определение координат источника звука в пассивном режиме работы шумопеленгаторной станции в условиях дальних зон акустической освещённости (ДЗАО), которые наблюдаются в большинстве глубоководных районов Мирового океана.

В работе путём анализа фундаментальных работ по распространению акустического сигнала в водной среде и имитационного моделирования установлены закономерности поведения угла в вертикальной плоскости прихода на вход приёмной антенны максимума энергии сигнала источника звука в условиях ДЗАО. На основе установленных закономерностей предложены алгоритмы определения координат приповерхностного и подводного источников сигнала, позволяющие определять дистанцию до приповерхностного источника с предельной погрешностью от 2 % до 5 %, до подводного источника — от 3–4 % до 7–8 %.

*Литература*

1. Акустика океана / Под ред. Л. М. Бреховских. М.:Наука, 1974.
2. Климатические характеристики скорости звука в северной части Тихого океана. М.:Московское отделение Гидрометеоздата, 1981.
3. Климатические характеристики скорости звука в северной части Атлантического океана. М.: Московское отделение Гидрометеоздата, 1984.
4. Машошин А. И. Синтез оптимального алгоритма пассивного определения дистанции до цели // Морская радиоэлектроника. 2012. № 2 (40), С. 30–34.
5. Гидроакустические расчёты для станции шумопеленгования. Свидетельство о государственной регистрации № 2021617661 от 26.04.2021г.
6. Машошин А. И. Особенности синтеза алгоритмов классификации подводных объектов по их гидроакустическому полю // Акуст. жур. 1996. Т. 42, № 3. С. 396–400.
7. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
8. Микушин И. И., Серавин Г. Н. Методы и средства измерения скорости звука в море. СПб.: Судостроение, 2012. 224 с.
9. Лободин И. Е., Машошин А. И. О возможности обнаружения современных подводных лодок в дальних зонах акустической освещённости // Морская радиоэлектроника. 2019. № 3 (69). С. 44–47.
10. Галкин О. П. О структуре звукового поля в глубоком океане // Акустика океана. Современное состояние. М.:Наука. 1982.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №22-29-00320).

## АЛГОРИТМ ПАССИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ

*А. В. Гриненков, А. И. Машошин, д-р техн. наук*

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## THE ALGORITHM OF PASSIVE DETERMINATION OF COORDINATES

*A. V. Grinenkov, A. I. Mashoshin, Dr.Sc.*

JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

*Рассматривается применимый в условиях сплошной акустической освещённости алгоритм определения дистанции до шумящего подводного объекта, если известна его глубина, либо определения глубины объекта, если известна дистанция до него.*

*The algorithm applicable in conditions of solid acoustic illumination for determining the distance to a noisy underwater object, if its depth is known, or determining the depth of the object, if the distance to it is known, is considered.*

**Введение.** Одной из актуальных практических задач гидроакустики является определение координат морских шумящих объектов по данным шумопеленгаторной станции (далее — ШПС). Для решения этой задачи известно большое число методов, обзор которых приведён в [1].

Один из методов базируется на использовании измеренной автокорреляционной функции (АКФ) широкополосного акустического сигнала (далее — сигнала) для определения координат (дистанции и глубины) источника сигнала [1–8]. Информация о координатах источника сигнала в измеренной АКФ заключена в расположении на оси абсцисс (времени) узкополосных интерференционных максимумов (далее — ИМ), обусловленных интерференцией коррелированных сигналов источника, пришедших на вход приёмной гидроакустической антенны ШПС по различным лучам. Каждой паре лучей в АКФ (при достаточном отношении сигнал/помеха — ОСП) [9]) соответствует один ИМ с шириной, равной обратной величине эффективной полосы частот сигнала на входе антенны, и положением на оси абсцисс, равным абсолютной величине разности времён распространения сигнала по интерферирующим лучам.

Определение координат источника сигнала рассматриваемым способом состоит в поиске такого положения источника сигнала по дистанции и глубине, для которого расчет параметров акустических лучей с использованием лучевой программы [10] показывает наличие в АКФ на выходе антенны ИМ, количество которых и расположение на оси абсцисс максимально близко количеству и расположению ИМ в измеренной АКФ.

**Обоснование алгоритма.** Главным недостатком описанного метода является многозначность результата определения координат источника сигнала. На рис. 1 изображено вертикальное распределение скорости звука. Проведённые исследования показали, что в условиях сплошной акустической освещённости многозначность результата проявляется существенно реже, если известна одна из двух координат источника — дальность либо глубина. Этот факт иллюстрируется на рис. 2, на которой для условий сплошной акустической освещённости в глубоком море с вертикальным распределением скорости звука, изображённым на рис. 1, приведены зависимости от дистанции и глубины источника абсциссы наибольшего по уровню ИМ в АКФ. За редким исключением, наибольший по уровню ИМ в АКФ образуется вследствие интерференции прямого луча и луча, однократно отражённого от поверхности.

Из рассмотрения рис. 2 следует, что имеет место взаимно однозначное соответствие между дистанцией, глубиной источника и абсциссой наибольшего по уровню ИМ в АКФ. Этот факт делает возможным определение глубины источника, если известна дистанция до него и, наоборот, определение дистанции до источника, если известна его глубина.



Рис. 1. Вертикальное распределение скорости звука.

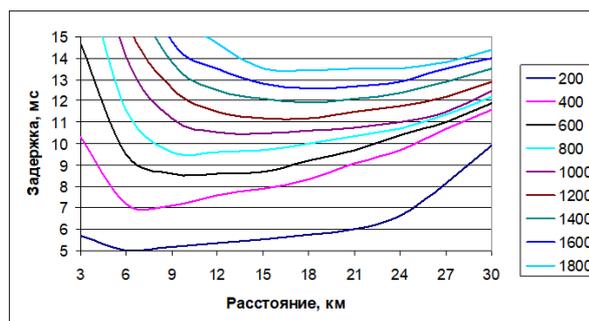


Рис. 2. Зависимость задержки между прямым лучом и лучом, однократно отразившимся от поверхности, от расстояния между источником и приёмником, расположенным на глубине 50 м; параметром графика является глубина источника.

На практике случаи, когда известна одна из двух координат цели — дистанция либо глубина, достаточно распространены. Например, дистанция до обнаруженной цели может быть определена в режиме гидролокации либо путём взаимного позиционирования по сигналам гидроакустической связи [11]. Глубина цели, как правило, известна при взаимодействии нескольких морских объектов в группе [12].

С учётом установленной закономерности алгоритм определения глубины источника имеет вид:

- 1) при обнаружении сигнала источника одним из методов определяется дистанция до источника;
- 2) с учётом глубины приёмника с использованием лучевой программы расчёта поля источника рассчитывается зависимость  $\tau_{max}(H)$  абсциссы наибольшего по уровню ИМ в АКФ от глубины источника в интервале возможных его глубин. Определяются границы, в которых может находиться абсцисса наибольшего ИМ;
- 3) вычисляется АКФ широкополосного сигнала источника и в ней выделяются узкополосные ИМ, абсциссы которых лежат в установленных границах. Из выделенных ИМ выбирается наибольший по уровню и определяется его абсцисса  $\hat{\tau}$ ;
- 4) если в установленных границах ИМ отсутствуют, выполнение шага 3 повторяется на новом временном интервале;
- 5) определяется глубина путём решения относительно  $H$  уравнения

$$\tau_{max}(H) = \hat{\tau}. \quad (1)$$

Определение дистанции до источника осуществляется аналогично:

- 1) с учётом глубины приёмника и известной глубины источника с использованием лучевой программы расчёта поля источника рассчитывается зависимость  $\tau_{max}(R)$  абсциссы наибольшего по уровню ИМ в АКФ от расстояния между источником и приёмником в интервале возможных дистанций. Определяются границы, в которых может находиться абсцисса наибольшего ИМ;
- 2) вычисляется АКФ широкополосного сигнала источника и в ней выделяются узкополосные ИМ, абсциссы которых лежат в установленных границах. Из выделенных ИМ выбирается наибольший по уровню и определяется его абсцисса  $\hat{\tau}$ ;
- 3) если в установленных границах ИМ отсутствуют, выполнение шага 2 повторяется на новом временном интервале;
- 4) определяется дистанция до источника путём решения относительно  $R$  уравнения

$$\tau_{max}(R) = \hat{\tau}. \quad (2)$$

**Экспериментальная проверка алгоритма.** Описанный алгоритм определения глубины источника был проверен в натуральных условиях. Эксперимент проводился в условиях сплошной акустической освещённости с вертикальным распределением скорости звука, изображённым на рис. 1. Источник широкополосного акустического сигнала находился на глубине 200 м. Приемник располагался на глубине 50 м. Горизонтальное расстояние между источником и приёмником составляло 1 км.

Сигнал источника на выходе приёмника подвергался автокорреляционному анализу в полосе 1–5 кГц. Измеренная АКФ приведена на рис. 3. В измеренной АКФ выделялся ИМ, абсцисса которого равна 13,4 мс.

Для условия эксперимента был выполнен расчёт лучевой структуры поля сигнала и по его результатам вычислена абсцисса наибольшего ИМ в АКФ в зависимости от глубины источника, которая изображена на рис. 4.

Войдя в график на рис. 4 с абсциссой ИМ 13,4 мс в измеренной АКФ, получаем оценку глубины источника 200 м, что соответствует истине.

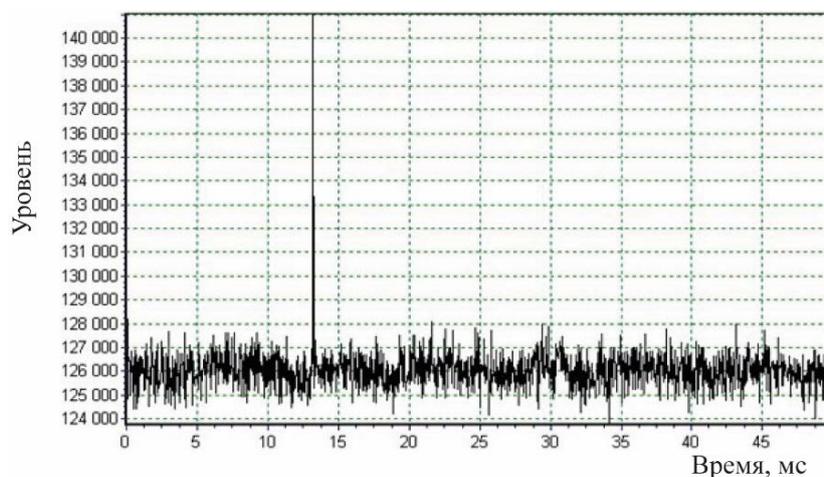


Рис. 3. АКФ широкополосного сигнала источника.

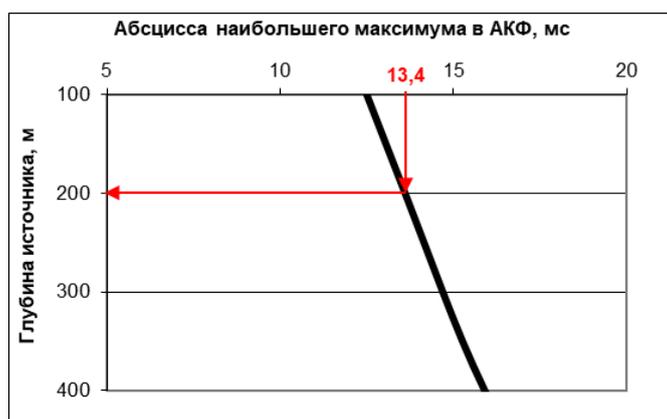


Рис. 4. Зависимость абсциссы наибольшего по амплитуде максимума в АКФ источника широкополосного сигнала, находящегося на расстоянии 1 км от приёмника, от глубины источника; глубина приёмника 50 м.

**Заключение.** Предложен алгоритм определения дистанции до шумящего подводного объекта, если известна его глубина, либо определения глубины объекта, если известна дистанция до него. Алгоритм применим в условиях сплошной акустической освещённости и базируется на измерении абсциссы наибольшего по амплитуде интерференционного максимума в корреляционной функции широкополосного шума подводного объекта и сравнении её с аналогичным параметром, рассчитанным для текущих гидроакустических условий.

*Литература*

1. Машошин А. И. Синтез оптимального алгоритма пассивного определения дистанции до цели // Морская радиоэлектроника. 2012. № 2(40). С. 30–34.
2. Hassab I. C. Contact Localization and Motion Analysis in the Ocean Environment: a Perspective // IEEE J. of Oceanic Engineering. 1983. Vol. OE-8, №3. P. 136–147.
3. Quazi A. H., Lerro D. T. Passive localization using time-delay estimates with sensor positional errors // JASA. 1985. Vol. 78, №5. P. 1664–1670.
4. Worthmann B. M., Song H. C., Dowling D. R. High frequency source localization in a shallow ocean sound channel using frequency difference matched field processing // J. Acoust. Soc. Am. 2015. Vol. 138. P. 3549.
5. Орлов Е. Ф., Фокин В. Н., Шаронов Г. А. Исследование параметров интерференционной модуляции широкополосного звука в глубоком океане // Акуст. жур. 1988. Т. 34. Вып. 5. С. 902–907.
6. Лазарев В. А., Орлов Е. Ф., Фокин В. Н., Шаронов Г. А. Частотная зависимость параметров интерференционной модуляции широкополосного звука в мелком море // Акуст. жур. 1989. Т. 35. Вып. 4. С. 685–688.
7. Патент РФ № 2 690 223.
8. Патент РФ № 2 724 962.
9. Машошин А. И. Помехоустойчивость выделения максимумов в корреляционной функции широкополосного шумового сигнала морского объекта, обусловленных многолучевым распространением сигнала в водной среде // Акустический журнал. 2001. Т. 47, № 6. С. 823–829.
10. Гидроакустические расчёты для станции шумопеленгования. Свидетельство о регистрации №2021617661 от 26.04.2021г.
11. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004.
12. Сахаров В. В., Чертков А. А., Тормашев Д. С. Алгоритм оптимального планирования группового взаимодействия роботов // Морской вестник. 2014. № 4 (52). С. 119–122.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

## ИНВАРИАНТНОСТЬ ОЦЕНКИ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА К УСЛОВИЯМ ПОДВОДНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА

А. Д. Консон, д-р техн. наук, А. А. Волкова, канд. техн. наук  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## INVARIANCE OF BROADBAND SIGNAL SOURCE DIPPING DEPTH ESTIMATION UNDER CONDITIONS OF UNDERWATER ACOUSTIC CHANNEL

A. D. Konson, Dr.Sc., A. A. Volkova, Ph.D.  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Рассмотрена возможность однокоординатной пространственной локализации по глубине погружения источника широкополосного сигнала в подводном звуковом канале путем анализа временных задержек парной конгруэнции лучей. Показано, что относительное запаздывание сигналов пары смежных лучей связано с глубиной погружения источника, и может быть использовано при решении задачи локализации источника по глубине погружения. Показана инвариантность результатов решения к различным моделям подводного звукового канала и к расстоянию до источника звука. Для практического использования предложен метод пространственной статистики, который интегрирует совокупность возможных решений по дальности.*

*The possibility of single-coordinate spatial localization by dipping depth of the broadband signal in underwater acoustic channel using analysis of time delays of the pair congruence of beams is discussed. It is shown that relative delay of signals of a pair of adjacent beams is caused by dipping depth of the source; it can be used when solving the problem of source localization by dipping depth. The invariance of solution results regarding different models of underwater acoustic channel and distance to sound source is shown. A method of spatial statistics that integrates the totality of solutions by distance is proposed for practical use.*

**Введение.** Помимо классической задачи обнаружения и пеленгования, традиционно решаемой средствами шумопеленгования [1], важное место занимает практическая задача оценки пространственных координат (дальности и глубины погружения) значительно удаленного подводного источника звука [2–6]. При этом, известно [7], что решение этой задачи, в общем случае, является многозначным. В работе [8] высказана гипотеза, что «принятые пары неразрешенных характеристик направленности лучей (двухлучевые пакеты) в значительном большинстве случаев содержат в относительном запаздывании сигналов лучей достаточно точную информацию о глубине источника сигнала». Указанная гипотеза нашла свое подтверждение в работе авторов доклада [9], в которой для условий подводного звукового канала Черного моря в летний период показано, что относительное запаздывание сигналов пары смежных лучей действительно однозначно связано с глубиной погружения источника.

Целью данной работы является подтверждение возможности оценки глубины погружения источника широкополосного сигнала при парном распространении лучей в различных гидролого-акустических условиях.

**Парное распространение лучей как основа для оценки глубины.** Анализ распространения совокупности лучей в различных гидролого-акустических условиях показывает, что при приеме сигнала в вертикальной плоскости могут существовать пары пространственно-неразрешенных характеристик направленности лучей (двухлучевые пакеты). Это видно на примере характерного распространения лучей в вертикальной плоскости между двумя фиксированными точками, разнесенными по дистанции на расстояние 50 км в условиях сплошной освещенности (Японское море, зима). На рис. 1 (справа) представлен пример траекторий таких лучей для случая, когда источник находится на глубине 200 м (красная точка), а приемник — на глубине 1000 м. В угловом распределении лучей в точке приема видны две отдельные пары расположенных рядом смежных лучей. В работе [9] аналогичное распространение пар лучей показано для условий подводного звукового канала (Черное море, лето).

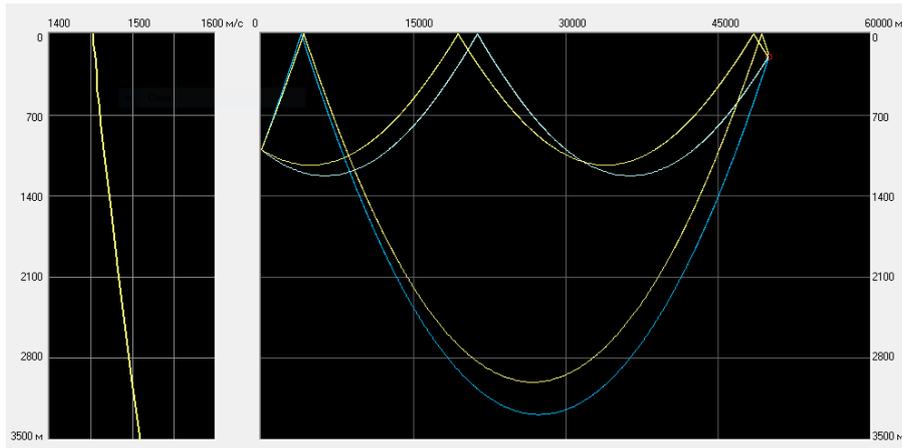


Рис. 1.

Слева — вертикальное распределение скорости звука (Японское море, зима);  
справа — траектории лучей в вертикальной плоскости между двумя фиксированными точками.

В исследовании, проведенном в работе [9] предложена аналитическая модель распространения пар лучей, которая позволяет основываться на следующем соотношении:

$$\Delta T \cdot C = 2h \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  — время задержки сигнала в паре смежных лучей;  $C$  — средняя скорость звука;  $h$  — расстояние по вертикальной координате между глубиной погружения источника и горизонтом полного внутреннего отражения (отражения от поверхности);  $\alpha$  — абсолютное значение среднего угла выхода двух лучей в паре.

Значение угла выхода луча  $\alpha$  является функцией параметра  $h$ . Таким образом, в равенстве (1) имеем слева то, что можно оценить при приеме сигнала, а справа то, что нужно определить. Найти решение для  $h$  можно итерационным методом. Далее, зная значение скорости звука на горизонте полного внутреннего отражения  $C_{\text{отр}} = \frac{C_{\text{пр}}}{\cos \alpha_{\text{пр}}}$  при известных значениях скорости звука  $C_{\text{пр}}$  и угла прихода сигнал  $\alpha_{\text{пр}}$  на горизонте приема, можно определить глубину залегания горизонта полного внутреннего отражения сигнала  $H_{\text{отр}}$ , имея для этого вертикальное распределение скорости звука. Тогда глубина погружения источника определится как  $H = h + H_{\text{отр}}$ .

**Возможности определения глубины в различных гидролого-акустических условиях.** Компьютерное моделирование в различных гидролого-акустических условиях проведено с помощью лучевой программы, разработанной сотрудником Концерна «Океанприбор» К. В. Мановым, на основе плоскослоистой модели среды с ровным дном. В качестве гидролого-акустических условий выбраны условия, в которых парные лучи распространяются различным образом:

- парные лучи претерпевают полное внутреннее отражение (Японское море, лето);
- на верхнем цикле лучи отражаются от поверхности (Японское море, зима, рис. 1);
- на нижнем цикле лучи отражаются от дна (Индийский океан).

При моделировании глубина приемника была зафиксирована на отметке 1000 м. Источник перемещался по глубине от 50 до 900 м с шагом 50 м. Горизонтальное расстояние между приемником и источником варьировалось от 50 до 200 км с шагом 50 км.

Результаты моделирования приведены на рис. 2–4 для соответствующих гидролого-акустических условий. На каждом рисунке приведено по три графика:

- а) вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ) для условий эксперимента;
- б) время задержки сигнала  $\Delta T$  в паре смежных лучей от глубины погружения источника  $H$  для нескольких расстояний до источника  $r$ ;
- в) оценка глубины  $\hat{H}$  по задержке и углу выхода на основании выражения (1) для истинной глубины  $H$  и нескольких расстояний до источника  $r$ .

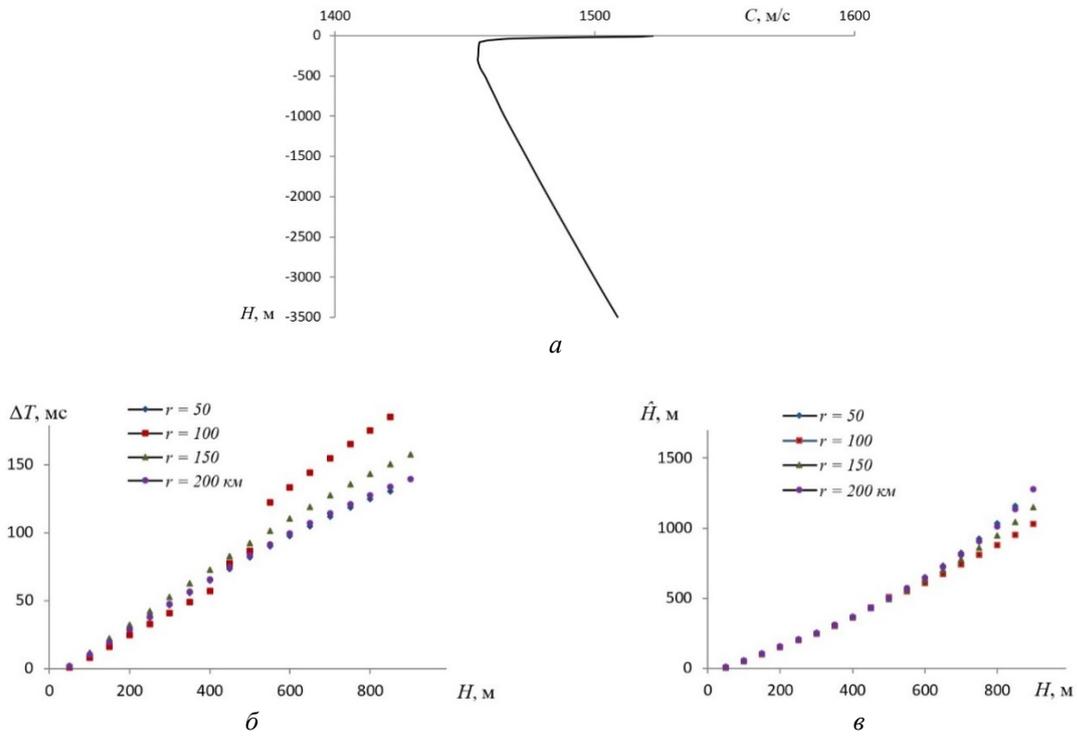


Рис. 2. Результат анализа пары лучей в Японском море (лето).

*a* — ВРСЗ; *б* — задержка между лучами; *в* — оценка глубины по задержке и углу выхода (полное внутреннее отражение лучей).

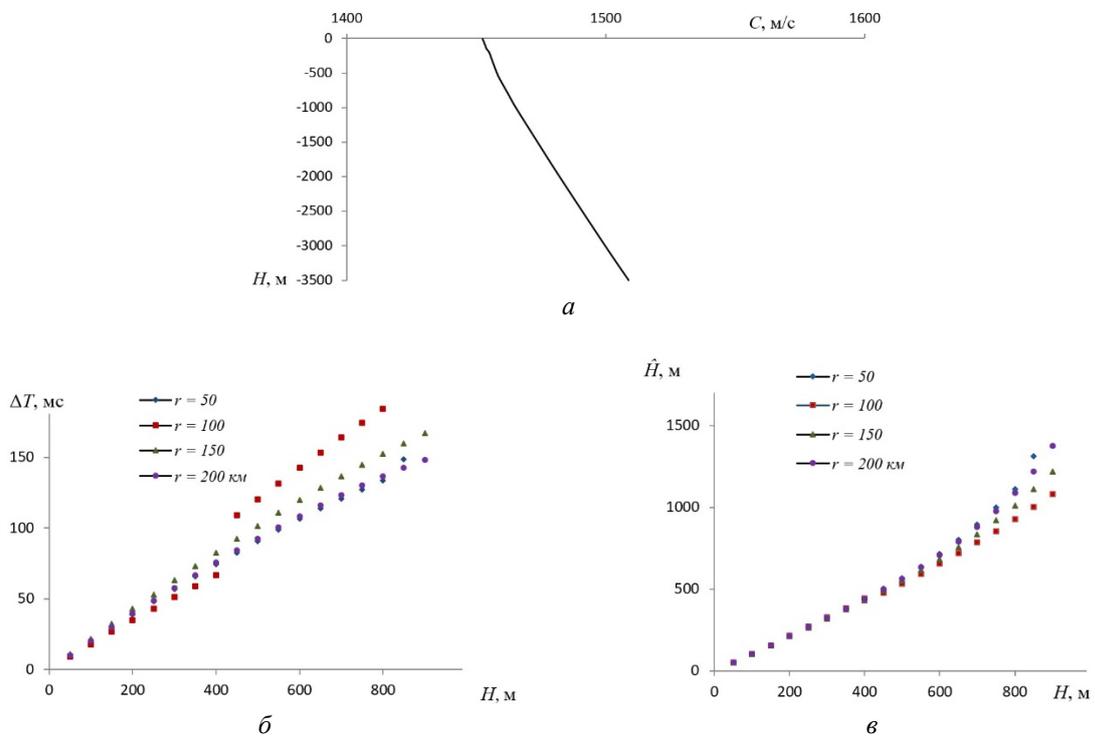


Рис. 3. Результат анализа пары лучей в Японском море (зима).

*a* — ВРСЗ; *б* — задержка между лучами; *в* — оценка глубины по задержке и углу выхода (на верхнем цикле лучи отражаются от поверхности).

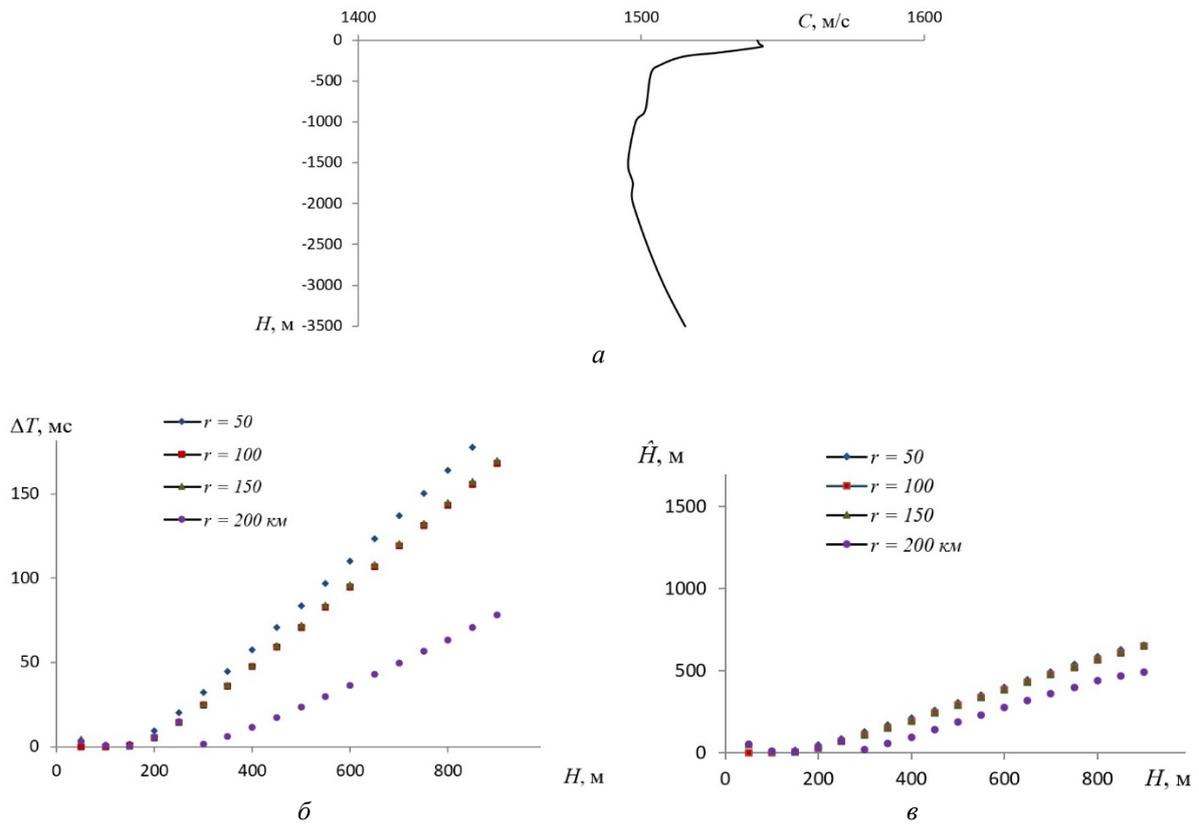


Рис. 4. Результат анализа пары лучей в Индийском океане.

$a$  — ВРСЗ;  $б$  — задержка между лучами;  $в$  — оценка глубины по задержке и углу выхода (лучи на нижнем цикле отражаются от дна).

Анализ представленных графиков позволяет выделить два важных момента, сохраняющихся при всех рассмотренных гидролого-акустических условиях:

- зависимость временной задержки  $\Delta T$  от глубины погружения источника  $H$  в первом приближении носит линейный характер;
- временная задержка для источника, находящегося на одной глубине, практически не зависит от расстояния до него, то есть глубина погружения источника является определяющим фактором задержки времени прихода сигнала для пары смежных лучей.

Из этого следует, что относительное запаздывание сигналов пары смежных лучей функционально однозначно связано с глубиной погружения источника вне зависимости от гидролого-акустических условий и дальности до источника. Это может быть использовано для оценки глубины погружения источника широкополосного сигнала. Для определения временной задержки сигнала по отдельным лучам следует применить метод, который базируется на использовании совокупности максимумов автокорреляционной функции принимаемого широкополосного сигнала в условиях существования интерференции коррелированных компонент сигнала, пришедших на вход приемной антенны по различным лучам [5, 6].

При этом, на рисунках 4 видно, что формульная зависимость (1), полученная в работе [9] приводит к однозначной оценке глубины погружения источника. Однако использование упрощенной модели формирования лучевой картины в окрестности точки излучения при получении выражения (1) приводит к нарастанию ошибки смещения с ростом глубины погружения источника. Для минимизации смещения при практической реализации может быть предложен метод пространственной статистики [9], когда в алгоритм [10], обладающий многозначностью решений по расстоянию, добавляется процедура интеграции совокупности возможных решений.

**Заключение.** В работе показано, что в различных условиях подводного звукового канала относительное запаздывание сигналов пары смежных лучей функционально связано с глубиной погружения источника, и может быть использовано для определения глубины его погружения. Показана инвариантность результатов решения к различным моделям подводного звукового канала и к расстоянию до источника. Для практического использования предложен метод пространственной статистики, который интегрирует совокупность решений по дальности с выделением истинного однозначного результата.

#### *Литература*

1. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004.
2. Baggeroer A. B., Kuperman W. A., Schmidt H. Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem // J. Acoust. Soc. Am. 1988. Vol. 83, № 2. P. 571–587.
3. Tolstoy A. Matched field processing for underwater acoustics // World Scientific Pub Co Inc 1992. 212 p. ISBN-10 0810210590.
4. Машошин А. И. Практические задачи гидроакустики, решаемые с использованием алгоритмов обработки сигналов, согласованных со средой их распространения (обзор) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 1. С. 22–30.
5. Машошин А. И. Алгоритм определения координат подводного акустического источника с использованием корреляционной функции его сигнала // Акуст. жур. 2019. Т. 65, № 6. С. 784–792.
6. Корецкая А. С., Мельканович В. С. Реализация лучевого метода оценки координат источника гидроакустического сигнала на основе интеллектуального сопоставления // Гидроакустика. 2017. Вып. 31(3). С. 13–22.
7. Машошин А. И. Исследование условий применимости корреляционной функции широкополосного многолучевого сигнала для оценки координат источника // Акуст. жур. 2017. Т. 63, № 3. С. 307–313.
8. Какалов В. А. О реализации согласованной со средой фильтрации гидроакустического сигнала от источника // Гидроакустика. 2021. Вып. 45(1). С. 22–30.
9. Консон А. Д., Волкова А. А., Корецкая А. С. Пространственная локализация источника широкополосного сигнала по глубине погружения в условиях подводного звукового канала // Гидроакустика. 2022. В печати.
10. Корецкая А. С., Мельканович В. С. Определение координат источника гидроакустического сигнала с использованием технологии индексного поиска // Гидроакустика. 2015. Вып. 21(1). С. 68–75.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «МАРС-16»  
НА ПОДВОДНОЙ ЛОДКЕ К-21 ПРИ АТАКЕ НЕМЕЦКОЙ ЭСКАДРЫ  
В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ 5 ИЮЛЯ 1942 г.  
К 80-ЛЕТИЮ ИСТОРИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ

В. А. Попов, канд. техн. наук, В. Б. Железный  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

USING A HYDROACOUSTIC STATION «MARS-16» ON SUBMARINE K-21 WHEN  
ATTACKING GERMAN SQUADRON IN NORWEGIAN SEA ON THE 5<sup>th</sup> OF JULY  
1942. TO THE 80<sup>th</sup> ANNIVERSARY OF THE HISTORICAL EVENT

V. A. Popov, Ph.D., V. B. Zhelezny  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Подводная лодка (ПЛ) Северного флота Советского Союза «К-21», в числе других ПЛ, развернутых на позициях вдоль побережья Скандинавского полуострова для прикрытия конвоя PQ-17, находилась с 4 июля 1942 г. в районе мыса Нордкап. Обнаружив с помощью гидроакустической станции (ГАС) «Марс-16» в режиме шумопеленгования немецкую эскадру, ПЛ вошла в ее ордер и атаковала торпедами флагмана группы — линкор «Тирпиц». В докладе, на основе анализа гидролого-акустической и имеющейся координатно-временной информации, подтверждается объективность записей в вахтенном журнале «К-21» и вводятся в научный оборот новые данные об атаке*

*USSR Northern Fleet submarine «K-21», among other submarines, that have been deployed in positions along the coast of The Scandinavian Peninsula for covering PQ-17 convoy, since the 4<sup>th</sup> of July 1942 g. was near North Cape. Having detected German squadron using hydroacoustic station «MARS-16», the submarine entered its order and torpedoed battleship Tirpitz — flagship of the squadron. Based on the analysis of hydrological-acoustical and available coordinate-time information, the paper proves the objectivity of log entries of «K-21» submarine and introduces new information about torpedo attack into scientific use.*

5 июля 2022 г. исполнилось 80 лет исторической атаке советской подводной лодкой Северного Флота «К-21» (командир Герой Советского Союза капитан 2-го ранга Н. А. Лунин) линейного корабля (ЛК) «Тирпиц», флагмана немецкой эскадры из 12 вымпелов, вышедшей на перехват полярного конвоя PQ-17 [1–4]. Когда PQ-17 находился на выходе из Норвежского моря, из-за опасений выхода в море немецкой эскадры по приказанию английского Адмиралтейства, не только дальнее, но и ближнее охранение покинуло конвой и ушло на запад, не достигнув советской операционной зоны и не предупредив об этом командование Северного флота. Торпедная атака «К-21» и переданные ею после атаки радиограммы о составе и курсе эскадры сорвали операцию по полному разгрому конвоя. Это позволило сохранить жизни морякам судов, брошенных англо-американским корабельным охранением и спасти часть судов конвоя. Штаб Северного флота по результатам анализа действий ПЛ «К-21», предотвратившей удар немецкой эскадры по конвою PQ-17, (и с учётом данных разведки) 24 августа 1942 г. засчитал экипажу ПЛ успешную торпедную атаку ЛК «Тирпиц» и потопление эсминца.

После возвращения в базу ЛК «Тирпиц» с 7 июля по 22 октября 1942 г. в море не выходил, а 23 октября 1942 г. перебазировался в Фэттен-фьорд для ремонта. Ремонт проводился плавмастерской «Хуаскаран» с использованием большого кессона для проведения работ ниже ватерлинии в кормовой части корпуса (известно о замене поврежденного левого руля) [5]. После ремонта ЛК до 5 марта 1943 занимался боевой подготовкой в базе. В сентябре 1943 г. «Тирпиц» подвергся взрывам мощных донных мин, выставленных под ним английскими сверхмалыми ПЛ, в результате которых в его днище образовались пробоины, были повреждены рулевая машина и левый руль. ЛК снова встал на ремонт, который продлился с ноября 1943 г. по апрель 1944 г. При налетах английской авиации 15 сентября и 29 октября 1944 г. ЛК получил повреждения в носу и корме. А при налете 12 ноября 1944 г. от попадания бомбы в кормовую часть и взрыва в погребе боезапаса ЛК «Тирпиц» затонул [5].

После атаки «К-21» английское военно-морское руководство в июле 1942 г. первоначально заняло позицию, что атака «К-21» могла стать причиной прекращения операции немецкой эскадры «Ход конем». Однако потом, учитывая большие потери конвоя PQ-17 от немецкой

авиации и подлодок, У. Черчиллем было указано, что срыв этой операции являлся результатом решения Адмиралтейства о рассредоточении конвоя [6]. Ему явно требовалось представить это решение в положительном аспекте. Такая политически поправленная оценка и породила английские утверждения о том, что «К-21» не попала в ЛК «Тирпиц». Также в 1945 г. после освобождения Норвегии английские водолазы провели обследования левого борта ЛК «Тирпиц», по результатам которого был сделан вывод, что попаданий торпед в ЛК не было. Каким образом осмотр многократно повреждавшегося и ремонтировавшегося корпуса ЛК позволил сделать такой вывод, не уточнялось. Поскольку часть архивов немецкого флота оказалась в Великобритании, у Адмиралтейства появилась возможность управлять информацией, знакомя с ней западных специалистов, придерживающихся английской версии. Им удалось ввести в оборот ряд немецких документов и переориентировать исследователей на изучение маневрирования «К-21» при выходе в атаку на основе немецких документов (по ним получалось, что «К-21» не могла поразить ЛК «Тирпиц» из-за крайне большой дистанции [6, 7]). При этом стало внедряться мнение, что эти документы являются вахтенными журналами ЛК «Тирпиц», хотя фактически это были краткие (отредактированные к 15.07.1942 г.) Журналы боевых действий (ЖБД) кораблей и штаба эскадры. При этом ограничение исследований атаки «К-21» реконструкциями возможных схем маневрирования на основе ЖБД ЛК привело к появлению так называемой «схемы К. Юана» [6, 7]», которая в пользу английской версии практически вытеснила системные исследования событий, как до момента атаки «К-21», так и после нее.

Авторы настоящего доклада, на основе анализа гидролого-акустической характеристики района атаки и имеющейся координатно-временной информации на 5 июля 1942 г., провели дополнительное исследование. Так, моделирование по программе расчета оценок дальности гидроакустического обнаружения в режиме шумопеленгования [8], позволило по заданным уровню шумоизлучения объектов (кораблей немецкой эскадры) и параметрам ГАС (ШПС «Марс-16»), определить зоны обнаружения целей в зависимости от географических координат трассы распространения сигналов, с учётом свойств и рельефа дна, состояния моря, распределения значений скорости звука по глубине для выбранного сезона (месяца). При этом, программа [8] производит расчет по волновой модели распространения, которая для низких частот обеспечивает большую точность расчетов, чем расчеты по лучевой модели [9].

Акустические приемники, установленной на «К-21» ШПС «Марс-16», располагались в носовой оконечности ПЛ (рис. 1) симметрично по каждому борту, образуя вписанную в обводы носа лёгкого корпуса ПЛ однорядную антенну в форме эллипса [10]. Общая структура построения ШПС «Марс-16» приведена на рис.1. Поиск целей осуществлялся путём прослушивания оператором акустических сигналов, принимаемых с различных направлений, и выделения характерных сигналов от кораблей на фоне шумов моря и собственных помех ПЛ в диапазоне частот от  $\sim 1$  кГц до  $\sim 5,5$  кГц (при длительности накопления на слух  $\sim 1$  с). По носовым обводам корпуса ПЛ получается, что апертура и концентрация антенны на курсовых углах (КУ) около  $0^\circ$  соответствовали апертуре и концентрации плоской антенны с габаритами 1,4–1,5 м по длине и 0,1 м по высоте (6 приемников), а при КУ от 25 до 45 — апертуре и концентрации плоской антенны с габаритами 1,6–1,8 м по длине и 0,1 м по высоте. При наблюдении целей в кормовых КУ, характеристики были сравнимы с приёмом на одиночный гидрофон. Эффективность обнаружения целей в ШПС «Марс» сильно зависела от квалификации оператора. Поскольку при поиске сигналов удаленных кораблей с уровнями шума, сравнимыми с окружающей помехой, часто могут происходить ложные обнаружения, при расчётах вероятность ложной тревоги следует задавать величиной 0,001 на элементарный канал прослушивания (это дает вероятность ложной тревоги на всю систему около 0,03–0,06 без учета кормовых секторов). Суммарную приведенную помеху на одиночном канале ШПС «Марс» следует оценить, как  $0,007\text{--}0,009 \text{ Па}\cdot\text{кГц}/(\text{Гц})^{0,5}$  для скорости ПЛ равной 3 узла. Реконструкция параметров ШПС «Марс-16» была проверена сопоставлением дистанции обнаружения ПЛ в надводном положении (уровень шумоизлучения  $2\text{...}3 \text{ Па}\cdot\text{м}\cdot\text{кГц}/(\text{Гц})^{0,5}$ ), рассчитанной по программе [8] в декабрьских условиях Баренцева моря с глубинами  $\sim 250$  м и при волнении 3 балла, с дистанцией обнаружения, приведенной в [11] для таких же зимних условий.

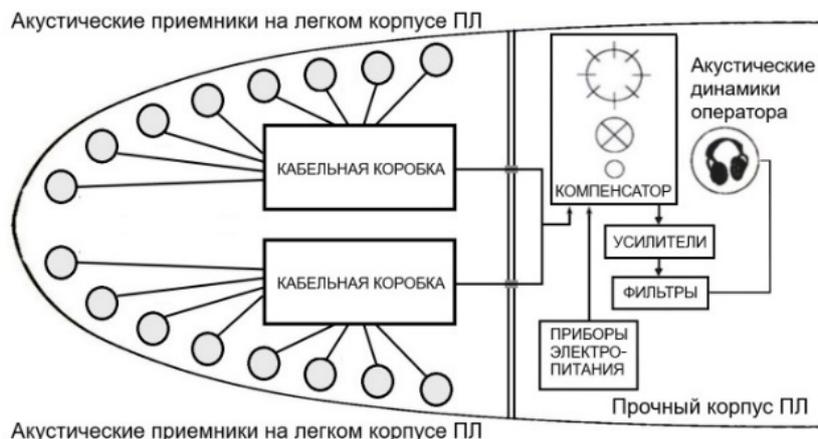


Рис. 1. ШПС Марс-16.

Уровни шумоизлучения надводных кораблей периода 2-й Мировой войны были хорошо изучены и представлены в [9]. Там же дано выражение для расчета уровней шумоизлучения в зависимости от водоизмещения и скорости корабля при наблюдении его со стороны борта и указаны поправки на уменьшение шума при наблюдении его в носовом и кормовом аспектах. Рассчитанные по этой формуле [9] значения приведенных к 1 кГц уровней шумоизлучения кораблей немецкой эскадры даны в табл. 1.

Таблица 1

Уровни шумоизлучения кораблей немецкой эскадры

| Корабль (группа кораблей) | Уровень шумоизлучения, Па·м·кГц/(Гц) <sup>0.5</sup> (по борту / в носовом секторе) |                |                 |                 |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
|                           | Скорость 18 уз                                                                     | Скорость 20 уз | Скорость 22 уз  | Скорость 24 уз  |
| ЛК «Тирпиц»               | 36 / (12...24)                                                                     | 49 / (16...32) | 65 / (22...42)  | 85 / (28...56)  |
| КЛ «Шеер»                 | 21 / (7...14)                                                                      | 29 / (10...20) | 38 / (12...25)  | 50 / (17...34)  |
| ТК «Хиппер»               | 23 / (8...15)                                                                      | 31 / (11...21) | 41 / (13...27)  | 53 / (18...35)  |
| Группа эсминцев           | 27 / (9...18)                                                                      | 38 / (12...25) | 50 / (17...34)  | 65 / (22...45)  |
| Эскадра                   | 55 / (18...37)                                                                     | 76 / (25...51) | 101 / (33...67) | 131 / (43...87) |

Указанных уровней шумоизлучения, характеристик ШПС «Марс-16» и состояния моря (июль, волнение 2 балла) достаточно для расчетов зон обнаружения по программе [8].

Оценим достоверность смещения места «К-21» на основе сопоставления акустического пеленга по документам «К-21» [1, 6] с прокладкой маршрута ЛК «Тирпиц» на основе сведений из его ЖБД за 5 июля 1942 г. [6]. По вахтенному, штурманскому и акустическому журналам ПЛ К-21 (ВЖ ШЖ АЖ), а также по сведениям, приведенным в [1, 6], о хронологии событий на К-21 во время атаки известно: 1) координаты «К-21» перед погружением были определены на три момента времени: 71°27'8" с.ш., 24°34'5"в.д. в 16:00; 71°21'8" с.ш., 24°35'7"в.д. в 16:02; 71°27'0" с.ш., 24°36'5"в.д. в 16:06 (время для ПЛ и ЛК пересчитано на Московское в формате «часы.минуты»); 2) в 16:22 гидроакустик А. Сметанин обнаружил по КУ=30° правого борта (п.б.) неясный шум; 2) в 16:30 во время движения ПЛ по направлению на шум по тому же КУ=30° гидроакустик уверенно обнаружил шум винтов надводных кораблей (в АЖ им записано «пеленг 30° п.б.»). Ход ПЛ был 3 уз, курс истинный (КИ) 182°, глубина погружения 20 м, местонахождение — около точки А (рис. 2). Из ЖБД ЛК известно, что в 16:06 в точке SR1 (точка на немецких картах) ЛК на скорости 24 уз лег на курс 30°, а в 17:25, сохраняя скорость 24 уз, повернул на курс 90°, на котором был до 19:58 [6]. Из немецкой штабной карты, приведенной в [6], видно, что точка SR1 лежит на пересечении параллели южного края острова Ингёйа с меридианом, проходящим через основания восточных мысов острова Сёрёйа, что позволяет восстановить координаты точки SR1, как 71°2'48"с.ш., 23°27'43"в.д. Зная координаты точки SR1, курс и скорость из ЖБД ЛК, можно построить схему его движения (рис. 2, а). Рассмотрим эту

схему. С 16:06 (SR1) до поворота в 17:25 (F) ЛК прошел 58,5 км, а от точки поворота F — еще 26,7 км до точки G (71°30'0" с.ш., 25°2'35" в.д., время 18:01). Отметим, что до 18:01 ПЛ «К-21» не сближалась с ЛК «Тирпиц» с западных направлений, находясь восточнее меридиана «б» (рис. 2, а), проходящего через точку G. Отсчитывая расстояние от точки SR1, можно найти место положение ЛК по легенде его ЖБД на 16:22 и на 16:30 (точки C и D на рис. 2, а). Поскольку направление на неясный шум, зафиксированное оператором ШПС «Марс-16», составляло в 16:22 КУ=30 п.б. и КУ=30 п.б. в 16:30 по обнаруженным шумам винтов (при курсе ПЛ КИ=183) [6], то проведя линию от точки D по обратному КУ=30 направлению до пересечения с меридианом, проходящим через G, в точке H получим альтернативное истинному (ложное) положение «К-21». Очевидно, что перемещение «К-21» в точку H на основе данных ЖБД ЛК с учетом зафиксированных акустических пеленгов ШПС «Марс-16» является ошибочным по причине искажения данных в ЖБД ЛК. ПЛ не могла из H быстро приблизиться к ЛК «Тирпиц», так как расстояние H–G было более 40 км. При этом расчеты акустических зон доступности по [8] на трассах C–H (95...96 км) и D–H (89...90 км) показывают отсутствие возможности обнаружения немецкой эскадры с уровнем шумов 86 Па·м·кГц/(Гц)<sup>0,5</sup> (рис. 3, а, б) даже при заниженной вероятности правильного обнаружения (ВПО) равной 0,5 и использовании апертуры приемной антенны 1,8 м (по длине).

Используем [8] для расчета зон обнаружения немецкой эскадры на основе данных АЖ, ШЖ и ВЖ ПЛ «К-21» по времени, координатам, акустическим пеленгам и характере принимаемого шума в предположении, что немецкая эскадра шла на ПЛ со скоростью 24 уз (с уровнем шумов 86 Па·м·кГц/(Гц)<sup>0,5</sup>). Используем координаты ПЛ перед погружением и пеленг на эскадру в момент обнаружения (условная линия А–В на рис. 2б), при этом моделирование обнаружения по [8] из точки с координатами 71°27'0" с.ш., 24°36'5" в.д. при КУ=30 п.б. (и курсе ПЛ КИ=183) показывает, что обнаружение эскадры с дистанции более 45 км невозможно из-за влияния высокого хребта подводного продолжения острова Фрухольмен в условиях летней гидрологии мелкого моря (рис. 4, а). А если переместить точку наблюдения на 5...7 км на север в область 71°30'...71°31' с.ш. при 24°36'5" в.д., то зоны обнаружения настолько расширяются (рис. 4, б), что оператор ШПС «Марс-16» в 16:22 вместо неясного шума [1] мог бы услышать сильные шумы винтов эскадры с дистанции около 68 км, но в реальности этого не было.

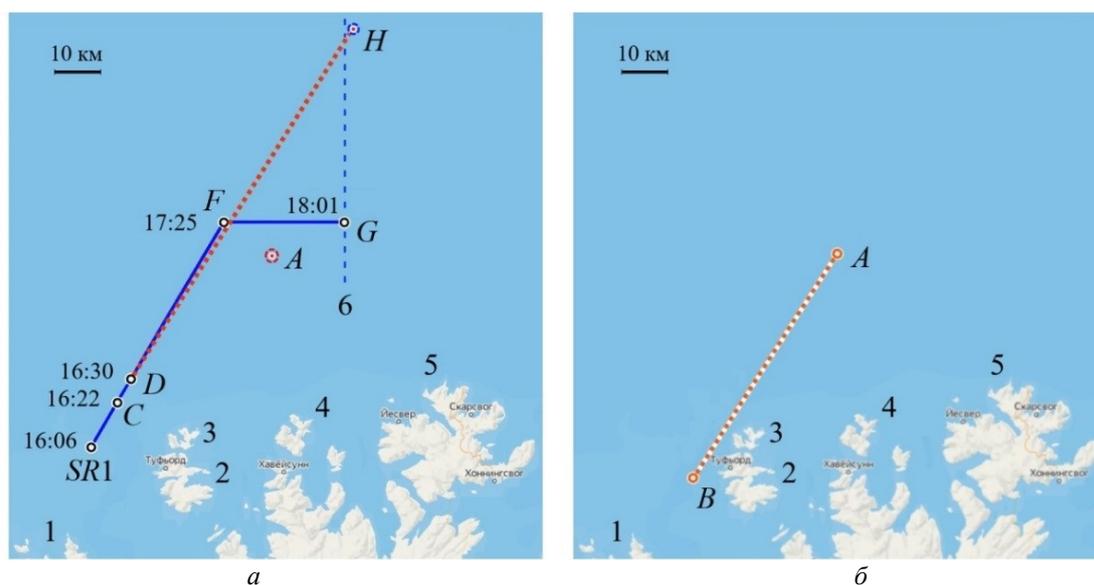


Рис. 2. Позиция ПЛ К-21, полученная на основе совмещения данных ЖБД ЛК «Тирпиц» и акустических пеленгов К-21 (а), и реальная позиция ПЛ К-21 по ВЖ, ШЖ и АЖ К-21 (б).

А — Позиция ПЛ по ШЖ (18:06); А–В линия истинного акустического пеленга по АЖ, ШЖ и ВЖ при первичном обнаружении немецкой эскадры; SR1–C–D–F–G маршрут ЛК «Тирпиц» по его ЖБД (C — в 16:22, D — в 16:30 ч; F — в 17:25, G — в 18:01); H — ложное положение К-21, вытекающее из ЖБД ЛК «Тирпиц»;  
 1 — северо-восточный мыс острова Сёрёйя; 2 — о-в Рольвсёйя; 3 — о-ва Ингёйя и Фрухольмен; 4 — о-в Йельмсёйя; 5 — мыс Нордкап о-ва Магерёйя; 6 — меридиан, проходящий через G.

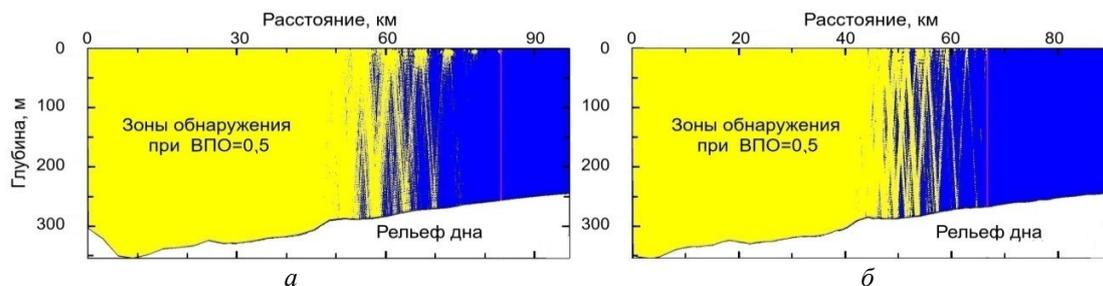


Рис. 3. Зоны обнаружения для трасс С–Н (а) и D–Н (б), полученных на основе ЖБД ЛК.

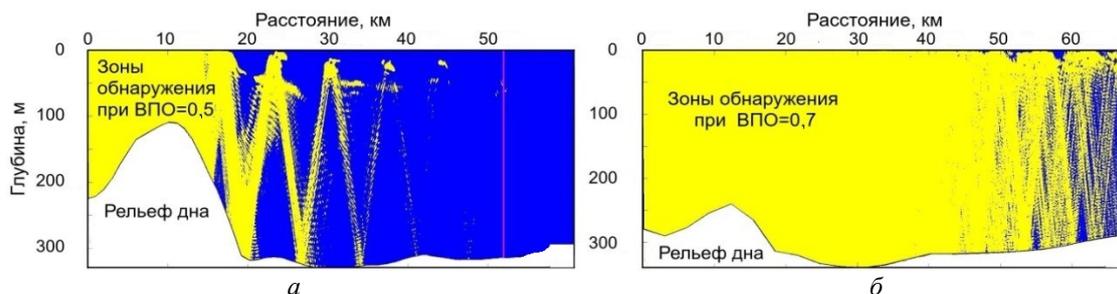


Рис. 4. Зоны обнаружения эскадры при нахождении антенны ШПС «Марс-16» в точке  $71^{\circ}27'0''$  с.ш.,  $24^{\circ}36'5''$  в.д. (а) и точке  $71^{\circ}30'40''$  с.ш.,  $24^{\circ}36'5''$  в.д.

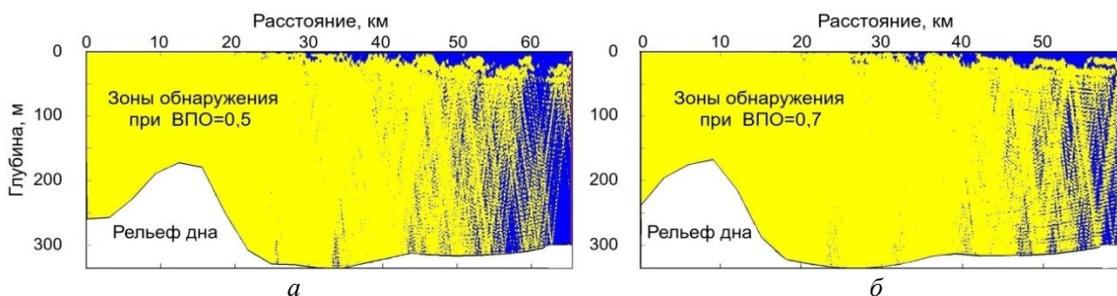


Рис. 5. Зоны обнаружения эскадры при использовании ШПС «Марс-16» из точки с координатами  $71^{\circ}28'30''$  с.ш.,  $24^{\circ}36'$  в.д. при дистанции до эскадры 65 км (а) и 60 км (б).

Фактически, как показывает моделирование, обнаружения немецкой эскадры в 16:22 и в 16:30 могли произойти при нахождении ПЛ в пределах области от  $71^{\circ}28'$  с.ш. до  $71^{\circ}29'$  с.ш. при  $24^{\circ}36'$  в.д. Так моделирование обнаружения при нахождении ПЛ в точке  $71^{\circ}28'30''$  с.ш. и  $24^{\circ}36'$  в.д. показывает, что при заглублении антенны ШПС — 26...30 м неясный шум (ВПО=0,5) в 16:22 мог быть обнаружен оператором ШПС на дальности 64...65 км до немецкой эскадры (рис. 5, а), а шумы винтов (ВПО=0,7) в 16:30 могли быть обнаружены уже с расстояния 59...60 км (рис. 5, б). При этом небольшое смещение на 3...5 км на север от места, указанного в ШЖ на 16:06 является вполне допустимой невязкой при визуальном определении координат по береговой линии и приметным возвышенностям островов в 38...43 км от ПЛ.

Таким образом, моделирование по [8] позволяет подтвердить объективность данных АЖ, ШЖ и ВЖ ПЛ «К-21» в части развития событий перед атакой [1], а следовательно и достоверность акустической фиксации двух взрывов через 2 мин 15 с после пуска в 18:01 торпед, и поставить под сомнение сведения ЖБД ЛК. В части же вопроса о результативности атаки ПЛ «К-21» следует опираться на донесение советской агентурной разведки о попадании торпеды в левый руль ЛК «Тирпиц» [6], которое подтвердилось работами по замене руля ЛК в октябре 1942 г. [5]. При этом критика этого донесения по причине отсутствия ЛК в июле 1942 г. в районе Тронхейма [6], не учитывает того, что упоминание Тронхейма могло появиться не как места стоянки ЛК, а как места, где планировалось провести ремонт «Тирпиц», который там и произошел позднее после постройки кессона.

*Литература*

1. Сергеев К. М. Лунин атакует «Тирпиц». М.: ЭКСМО «Яуза», 2005. 307 с.
2. Терминологический словарь-справочник по гидроакустике / Судостроение. 1989. 368 с.
3. Кольшкин И. А. Атаки североморцев / Под ред. Н. А. Черкашина // Из бездны вод: Летопись отечественного подводного флота в мемуарах подводников. М.: Современник, 1990. 557 с.
4. Хроника Великой Отечественной войны Советского Союза на Северном театре с 01.07.42–31.12.42 гг. СПб.: «Галея Принт», 2000. 156 с.
5. Малов А. А., Пятянин С. В. Линкоры «Бисмарк» и «Тирпиц». Яуза Эксмо, 2006. 112 с.
6. Скрынников Н. Р., Морозов М. Э. Неизвестная атака командира Лунина. М.: Абрис, 2019. 448 с.
7. Huan C., La Marine sovietique en guerre // Arctique. Economica, 1991. 302 p.
8. Козлов А. Н., Попов О. Е., Авилов К. В., Смирнов Д. А. Программа для расчета оценок дальности гидроакустического обнаружения ПО по первичному ГАП / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017613682 от 24.03.2017 г.
9. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
10. Антипов В. А., Железный В. Б., Ковалев В. Н., Макачук Ю. И. Отображение информации шумо-пеленгования в корабельных гидроакустических системах // Гидроакустика. 2018. Вып. 34, № 2. С.87–99.
11. Беркутов Р. Н., Попов В. А., Селезнев И. А. Отечественная военная гидроакустика в период Великой Отечественной войны (1941–1945) // Гидроакустика. 2016. Вып. 27, № 3. С. 90–105.

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ БЕЗЭКИПАЖНЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

А. И. Ясников

АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## CURRENT AND FUTURE TECHNOLOGY OF FOREIGN UNMANNED SURFACE VEHICLES

A. I. Iasnikov

JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Повышение мирового интереса к изучению морских глубин и мелководных участков в коммерческих, научных и военных целях вызвало соответствующую потребность в развитии безэкипажных надводных кораблей. Рассматриваются последние разработки в области развития безэкипажных надводных кораблей, предоставляющие конкурентные преимущества странам, вовлечённым в данный процесс.*

With growing worldwide interest in commercial, scientific, and military issues associated with both oceans and shallow waters, there has been a corresponding growth in demand for the development of unmanned surface vehicles. An overview of current developments in unmanned surface vehicles technology that provides competitive advantages for the countries involved in this process is presented.

**Введение.** В настоящее время всё большее распространение получают автономные безэкипажные надводные корабли (БЭК), способные выполнять целый ряд задач. Применение БЭК, для сбора и анализа информации об окружающей среде, прогнозирования её развития, принятия верных решений о дальнейших действиях и выполнения соответствующих операций для достижения поставленных целей, становится всё более эффективным средством для минимизации человеческого фактора и получения ряда преимуществ перед потенциальным противником. Успешный опыт применения БЭК свидетельствует о том, что уже в ближайшем будущем боевые корабли с экипажем на борту, на производство которых требуются большие затраты, будут дополняться и заменяться на менее дорогие и полностью автономные боевые единицы. В настоящее время США, Великобритания и ряд других государств занимаются разработкой и производством БЭК [1]. Выделяются такие крупные компании как: SeaRobotics Corp. (США), Elbit Systems Ltd. (Израиль), ECA (Франция), RAFAEL Advanced Defense Systems Ltd. (Израиль) Maritime Tactical Systems Inc. (США), Atlas Elektronik (Великобритания), Teledyne Technologies Incorporated (США), 5G International Inc. (США), International Submarine Engineering Inc. (Канада), SAAB Group (Швеция), Kongsberg Maritime (Норвегия) и другие.

**Современное состояние.** Многие из находящихся на вооружении БЭК представляют собой относительно простые разработки. Некоторые военно-морские БЭК построены на более современных платформах и способны выполнять более сложные задачи. Такие платформы отличаются повышенной автономностью, способностью обнаруживать цели за пределами прямой видимости и нести полезную нагрузку в модульном исполнении. К выполняемым задачам современного БЭК относится способность ведения разведки в инфракрасном и радиолокационном диапазонах, радиоэлектронное подавление радиоэлектронных средств противника; освещение обстановки и наблюдение в ходе патрулирования для обеспечения ситуационной осведомлённости в морских и прибрежных районах; проведение противоминных операций; охрана и защита границ, акваторий, портов; противолодочные операции; борьба с надводными целями путём перехвата кораблей и судов противника; сопровождение и маскирование собственных надводных средств; размещение на борту автономных необитаемых подводных аппаратов и беспилотных летательных аппаратов для их применения в качестве ретрансляторов связи. Кроме того, современные БЭК могут быть адаптированы выполнения военных задач.

БЭК принято классифицировать по длине и водоизмещению [2]. Они подразделяются на следующие основные классы:

- большие БЭК, имеющие длину более 50 м. и водоизмещение свыше 500 т;
- средние БЭК, имеющие длину от 12 до 50 м. и водоизмещение 10–500 т;

- малые БНК, имеющие длину от 7 до 12 м. и водоизмещение 1–10 т;
- сверхмалые БНК, имеющие длину до 7 м. и водоизмещение до 1 т;
- глайдеры — безэкипажные надводные аппараты с небольшим водоизмещением и возобновляемыми источниками энергии.

При этом существует возможность удалённого управления БНК, полуавтономного управления (при помощи операторов) и автономной работы как самостоятельно, так и совместно с надводными кораблями. На начальных этапах разработки БНК могут иметь несколько членов экипажа на борту.

После первых разработок [3], отличавшихся ограниченной функциональностью в рамках автономности, продолжительности работы, полезной нагрузки и других функций, в последнее время был достигнут значительный прогресс в области развития элементов подсистемы БНК, таких как элементы корпуса и конструкции, энергетическая система, система наведения, навигации и управления, телеметрия, средства освещения обстановки, варианты полезных нагрузок, управление данными и наземная станция связи.

Активное развитие в настоящее время безэкипажных надводных кораблей и катеров в ВМС ряда зарубежных стран ведёт к тому, что их роль и значение в военно-морских операциях будет возрастать [4]. Так ВМС США были приняты следующие концепции: «Distributed Maritime Operations» и «Expeditionary Advanced Base Operations», где ключевая роль отводится именно БНК, которые, как планируется, будут выполнять поставленные задачи во взаимодействии с другими надводными кораблями в составе их соединений и группировок. Командование американских ВМС рассматривает БНК в качестве средств, повышающих боевые возможности корабельных группировок при проведении морских операций [5]. В рамках программы НИОКР «Призрачный флот» планируется достижение надежного функционирования технических систем, главной энергетической установки, устройств и механизмов БНК в режиме полностью автономного управления и точной навигации. НИОКР также включают изучение и испытание корабельной автоматизированной системы боевого управления, связи и обмена данными; возможностей интеграции со средствами разведки и освещения обстановки, морской военной техникой и вооружением.

Стоит отметить, что программы создания БЭК имеет целый ряд зарубежных стран, среди которых помимо США следует выделить, Германию, Израиль, Сингапур, Великобританию и Францию.

Так, одним из лидеров в области разработки, проектирования и строительства БЭК является Израиль [6]. Вместе с БЭК типа «Protector» в состав ВМС Израиля принят БЭК «Seagull» компании Elbit Systems, оснащённый различным модульным вооружением (рис. 1).



Рис. 1. БЭК «Seagull» компании Elbit Systems.

На БЭК «Seagull» была установлена ГАС с буксируемой антенной TRAPS для проведения морских испытаний. Интеграция ГАС и БНК позволит расширить область оперативного использования БНК и круг решаемых задач при выполнении операций противолодочной обороны. Ранее на катере «Seagull» использовалась вертолётная активная опускаемая ГАС большой дальности действия HELRAS БНК «Seagull» предназначен для несения модульной полезной нагрузки и может использоваться для решения задач противоминной обороны, радиоэлектронной борьбы, обеспечения морской безопасности.

Развитие технологий БНК в азиатско-тихоокеанском регионе обусловлено геополитическими факторами. В последнее время передовые разработки предлагает Китай. Япония и Индия также выделяют значительные средства для развития данного направления. В данном регионе применение БНК используется для защиты экономических зон, морских границ и территориальных вод, а также нефтяных вышек.

**Перспективы развития.** Несмотря на значительные усовершенствования, касающиеся полезных нагрузок, элементов конструкции и автономности, имеется ряд проблем, требующих решения.

Состав и варианты реализации полезной нагрузки БНК соответствуют тем задачам, которые ВМС каждой из стран рассматривают в качестве приоритетных. Установка на БНК новейших систем значительно расширит круг выполняемых задач. Так, в качестве полезной нагрузки могут использоваться следующие варианты:

- средства навигационного обеспечения для передачи на корабль управления данных о местоположении, курсе и скорости БНК. К ним относятся инерциальные системы навигации, автоматизированная система опознавания, навигационная радиолокационная система, гидроакустическая система, а также оптико-электронные средства;
- средства освещения обстановки на море и на борту БНК для сбора информации в масштабе реального времени в режиме автономного управления. Для решения этой задачи на борту могут быть размещены гидроакустические и радиолокационные станции, инфракрасные и лазерные средства локации, станции идентификации кораблей и судов, телевизионные камеры;
- средства связи, необходимые для обеспечения управления с наземных и морских пунктов. В этом качестве могут выступать средства радио, гидроакустической, спутниковой и мобильной связи, оптоволоконные линии связи.

Вооружение БНК предназначено для ведения противоминных и противолодочных операций, поражения надводных целей, а также радиоэлектронной борьбы. В состав такого вооружения могут входить оружие на новых физических принципах, минно-торпедное и управляемое ракетное оружие, противоминные тралы. Размещение на БНК других необитаемых и беспилотных аппаратов преследует цель расширения области их применения.

Основные перспективы развития связаны с обеспечением автономности [7]. Для этого необходимо проработать траекторию движения БНК. В дальнейшем потребуются и более усовершенствованные методы исключения столкновений, такие как перепланировка траектории движения. В настоящее время были изучены методы исключения столкновений со статическими и полудинамическими объектами. Отдельного изучения требует метод исключения столкновений как для статических, так и для динамических объектов.

Необходима разработка навигационных технологий, подразумевающая усовершенствование процесса осуществления дальней навигации в режиме реального времени. Перспективы развития БНК также включают следующие позиции.

1. Измерительные технологии для навигации в среде с помехами:
  - а) радиолокационные технологии для обнаружения малоразмерных объектов в ближней зоне;
  - б) методы обработки гидроакустических данных для минимизации помех;
  - в) датчики формирования изображения для повышения надёжности и эффективности.
2. Методы оценки состояния БНК:
  - а) объединение данных от различных датчиков (GPS-IMU) для более точной оценки состояния БНК в условиях внешних помех и погрешности приборов;
  - б) адаптированное решение для оценки состояния БНК при воздействии сильных магнитных помех и вероятной поломки бортовых датчиков;
  - в) усовершенствование диагностирования датчиков;

г) выполнение оценки состояния БНК посредством вспомогательных активных и пассивных датчиков.

3. Ситуационная осведомлённость (получение данных о подводной и надводной обстановке).

4. Системы управления БНК:

- а) управление при большой скорости БНК;
- б) управление при неопределённости внешней среды и помехах;
- в) возможность сохранения работоспособности при отказе элемента системы;
- г) автономный спуск и докование;
- д) динамическое позиционирование.

5. Взаимодействие с АНПА.

Стоит более подробно рассмотреть положение о возможности сохранения работоспособности при отказе элемента системы БНК [8]. Вследствие увеличения времени эксплуатации и дальности при выполнении операции с помощью БНК, требуется обнаружение и диагностика неисправностей механических и электрических элементов системы БНК. Решение заключается в сочетании резервных механических и электрических элементов с механизмами перенастройки. Несмотря на повышение сложности разработки и стоимости такого БНК, это позволит решить одну из основных проблем при их использовании.

**Заключение.** Усовершенствования, принятые в автономии БЭК устойчивы, однако переход к системам, способным реагировать на неожиданные изменения в среде, не произошел и возможно не произойдет в самое ближайшее время. Необходимы существенные целевые инвестиции и разработки. Опора лишь на коммерческие стандартные технологии вряд ли позволит выполнять сложные военные задачи. Несмотря на то, что усилия сконцентрированы на разработке многофункциональных, очень сложных систем, более многообещающим вариантом повышения автономности БЭК могло бы быть использование простых систем с ограниченной автономностью для большинства функций — но с добавлением способности систем координировать действия друг с другом. Это особенно актуально для противоминной обороны, в которой растянутые временные рамки связаны с необходимостью иметь одну платформу, осуществляющую всю последовательность обнаружения, классификации, идентификации. Наличие большого количества взаимодействующих платформ с единственным датчиком могло бы значительно сократить время операции. БНК окажутся действительно эффективными лишь в случае использования при их создании методов теории искусственного интеллекта с применением машинного и глубокого обучения. Можно предположить, что при условии дальнейшей поддержки программ развития БНК достижение инновационных технологических решений, которые выведут БНК на новый уровень, может произойти к концу 2020-х гг. Переход к массовому производству таких систем будет способствовать изменению баланса сил с геополитическими оппонентами в наиболее значимых районах Мирового океана, а также значительно повлияет на характер ведения боевых морских операций в ближайшем будущем.

#### *Литература*

1. Спасский Б. А. Автономные безэкипажные корабли военного и двойного назначения. // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. №3. С. 9–15.
2. Зарубежное военное обозрение. 2022. № 1. С. 62–66.
3. Кирилова М. А., Рожко А. И. Перспективы развития безэкипажных судов в Российской Федерации // Вест. Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 16–22.
4. Ривкин Б. С. Беспилотные суда. Навигация и не только // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29, № 1. С. 127–130.
5. Чижов Д. А. Морские роботизированные системы и развитие военно-морской мощи США // Проблемы национальной стратегии. 2021. № 6. С. 174–182.
6. Kelvin Wong. Jane's Unmanned Maritime Vehicles 2019-2020, IHS Markit, 2019. С. 87–90.
7. Martin B., Tarraf D. C. Advancing Autonomous Systems. RAND Corporation. 2019. С. 9–11.
8. Zhixiang Liu, Youmin Zhang, Xiang Yu, Chi Yuan. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges // Annual Reviews in Control. 2016. С. 15–20.

## МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПЕЛЕНГАТОР ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В. З. Кранц<sup>1</sup>, Д. Б. Островский<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук<sup>1</sup>АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия

## SMALL-SIZE DIRECTION FINDER OF HYDROACOUSTIC SIGNALS

V. Z. Krants<sup>1</sup>, D. B. Ostrovskiy<sup>1,2</sup>, Dr.Sc.<sup>1</sup>JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia<sup>2</sup>Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Russia

*Рассмотрен вариант построения пеленгатора гидроакустических сигналов, многоэлементная цилиндрическая антенна которого имеет диаметр, близкий к четверти длины волны принимаемого сигнала, а в горизонтальной плоскости формируется статический веер пространственных каналов. При формировании статического веера используется принцип построения диаграммы направленности (ДН) типа «обратной кардиоиды». Предлагается алгоритм формирования «обратной кардиоиды».*

*The option of creation of the direction finder of hydroacoustic signals which multielement cylindrical antenna has diameter close to the quarter of wavelength of the accepted signal is considered. The static fan-shaped directional pattern (DP) is formed in the horizontal plane. When forming the static fan-shaped DP the principle of creation of the DP of the «return cardioid» is used. The algorithm of «return cardioid» forming is offered.*

Гидроакустические системы, предназначенные для определения направления (как правило, в горизонтальной плоскости) на источник гидроакустического сигнала, называют пеленгаторами. Общие принципы построения пеленгаторов гидроакустических сигналов (ПГС) изложены в [1]. В ПГС для исключения пропуска коротких сигналов реализуют одновременный обзор пространства в заданном угловом секторе путем использования веера направленных приемных пространственных каналов (ПК), в каждом из которых формируют диаграмму направленности (ДН), от ширины  $\Delta\theta_{07}$  которой зависит погрешность определения направления  $\theta_{\text{ист}}$  на источник сигнала. Совокупность ДН перекрывает рабочий сектор обзора, равный, в пределе,  $360^\circ$ . В этом случае приемная антенна может представлять собой цилиндр, по окружности которого расположены гидроакустические приемники (ГАП). Каждая ДН формируется рабочим сектором антенны — дугой окружности, содержащей некоторое количество ГАП, размер которой однозначно связан с шириной ДН. Направление максимума ДН проходит через центр окружности и центр рабочего сектора.

Сигналы с выходов всех ПК сопоставляются между собой по некоторому критерию, например, по уровню или по отношению сигнал/помеха, что позволяет выбрать ПК, ось ДН, которого ориентирована в направлении на источник сигнала.

Общим недостатком подобного способа формирования ДН является необходимость использования приемной антенны большого диаметра. Так, для формирования ДН, имеющей ширину на уровне  $-3$  дБ  $\Delta\theta_{07}=5^\circ$  на частоте 5 кГц диаметр антенны, должен быть 3,53 м. Кроме того, при рассмотренном способе формирования ДН требуется экранирование тыльной поверхности ГАП, что создает дополнительные технические проблемы при создании антенны.

Другой способ формирования ПК, не требующий тыльного экранирования, рассмотрен в [2]. В этом способе ДН формируется двумя ненаправленными приемниками ГАП-А и ГАП-Б, центры которых разнесены друг от друга на расстояние  $D=\lambda/4$ , где  $\lambda=c/f_n$ ,  $f_n$  — длина волны несущей частоты принимаемого сигнала,  $c$  — скорость звука (при  $f_n=5$  кГц  $D=7,5$  см). Тракт формирования содержит устройство задержки сигнала, принимаемого ГАП-Б, на время  $t_3=T/4$ , где  $T=1/f_n$  — период частоты  $f_n$ , а также сумматор и усилитель с АРУ, коэффициент передачи которого обратно пропорционален уровню управляющего сигнала, поступающего с выхода сумматора. Взаимодействие перечисленных устройств поясняется рис. 1.

На выходе сумматора, показанного на рис. 1, формируется кардиоидная ДН, которая в соответствии с [3], может быть представлена соотношением

$$R_k(\theta) = \left| \frac{\sin[kd(1 + \cos\theta)/2]}{\sin(kd)} \right|. \quad (1)$$

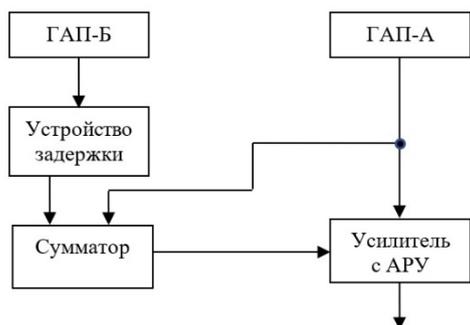


Рис. 1.

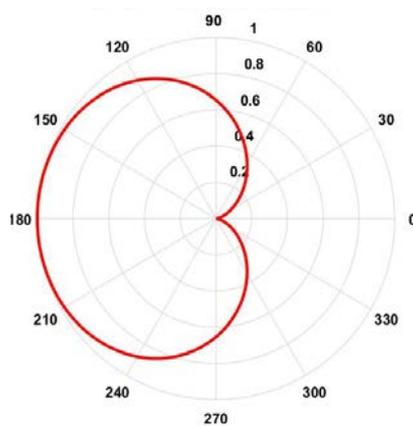


Рис. 2.

Нулевое значение сформированной кардиоидной ДН ориентировано в направлении от ГАП-Б к ГАП-А, которое можно обозначить как  $\theta_0=0^\circ$ , а максимальное — в противоположном. Вид кардиоидной ДН в полярной системе координат показан на рис. 2.

Как отмечалось ранее, коэффициент передачи усилителя с АРУ обратно пропорционален уровню сигнала на выходе сумматора. Поэтому такой усилитель выполняет, по сути, процедуру деления уровня сигнала с выхода ГАП-А, имеющего практически ненаправленную ДН, на уровень сигнала с выхода сумматора. При этом зависимость уровня сигнала на выходе усилителя с АРУ от угла  $\theta$  представляет собой ДН, обратную кардиоидной, и может быть представлена соотношением

$$R_{ок}(\theta) = 1/R_k(\theta). \quad (2)$$

Ось ДН типа «обратная кардиоида» ориентирована в направлении от ГАП-Б к ГАП-А, т.е. в направлении  $\theta_0$ , а максимум в направлении  $\theta_0+180^\circ$ . Вблизи максимума функция (2) стремится к  $\delta$ -функции, поскольку выполняется деление на 0.

На практике в кардиоидной ДН значения уровня, близкие к нулевым, отсутствуют из-за наличия, в частности, аддитивной помехи. Более того, значения функции (1) можно искусственно ограничить по минимуму величиной  $R_{мин}$ . В этом случае ДН, построенная, например, в соответствии с (2), будет иметь вид, показанный на рис. 3.

Горизонтальная площадка на графике рис. 3 определяет ширину  $\Delta\theta_{07}$  сформированной ДН типа «обратная кардиоида». Между величинами  $\Delta\theta_{07}$  и  $R_{мин}$  существует однозначная связь, показанная графически на рис. 4.

Очевидно, что одна пара приемников — ГАП-А и ГАП-Б — позволяет сформировать два приемных пространственных канала — ПК-А и ПК-Б, оси ДН, которых ориентированы в противоположных направлениях. Структурная схема такого тракта формирования приведена на рис. 5.

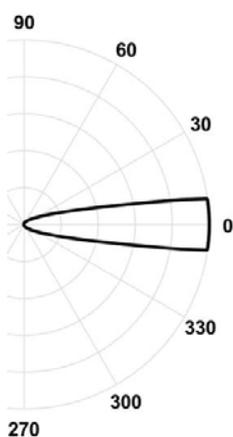


Рис. 3.

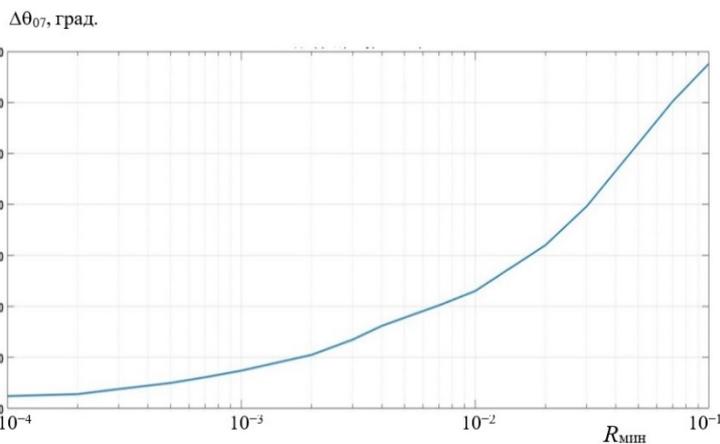


Рис. 4.

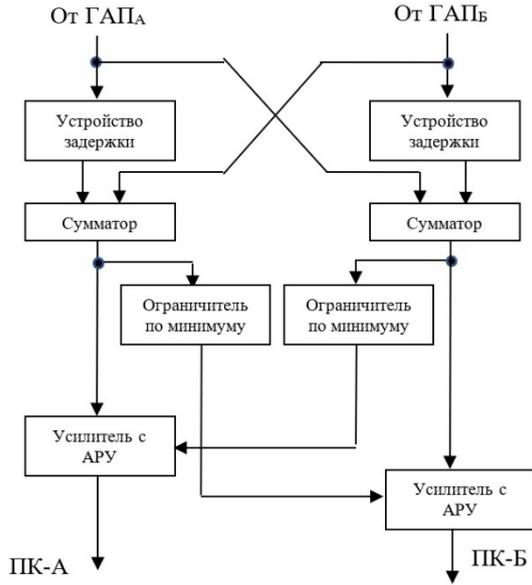


Рис. 5.

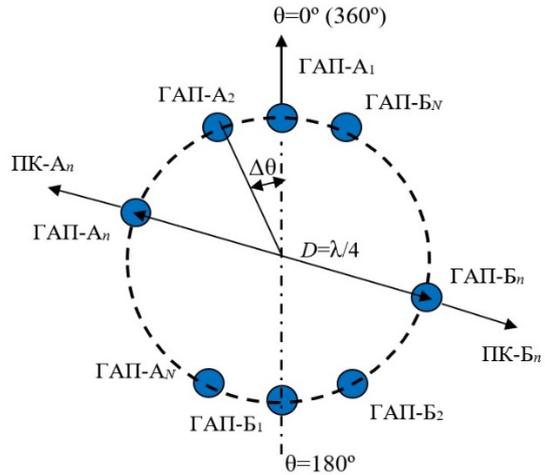


Рис. 6.

Для решения поставленной в ПГС задачи необходимо сформировать в горизонтальной плоскости статический веер из  $2N$  ПК в рабочем секторе  $360^\circ$ . Для этого используется звукопрозрачная цилиндрическая антенна диаметром  $D=\lambda/4$ , содержащая  $N$  приемников ГАП-А, размещенных в секторе углов  $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$  и  $N$  приемников ГАП-Б, размещенных в секторе углов  $180^\circ \leq \theta < 360^\circ$ . При этом все  $2N$  ГАП равномерно размещены по окружности антенны с угловым шагом  $\Delta\theta=360^\circ/(2N)$  (рис. 6).

На рис. 7 показаны три ДН —  $ДН_n$  и смежные с ней  $ДН_{n-1}$  и  $ДН_{n+1}$ , соответствующие трем ПК сформированного веера:  $ПК_n$  и смежным с ним  $ПК_{n-1}$  и  $ПК_{n+1}$ . Оси ДН этих каналов ориентированы в направлениях, соответственно,  $\theta_n$ ,  $\theta_n - \Delta\theta$  и  $\theta_n + \Delta\theta$ .

Если по результатам сопоставления уровней сигналов на выходах ПК выбран  $ПК_n$ , то направление  $\theta_{ист}$  на источник сигнала соответствует диапазону значений  $\theta_n \pm \Delta\theta/2$ . Поэтому при построении антенны в соответствии с рис. 7 для уменьшения погрешности определения  $\theta_{ист}$  необходимо уменьшать величину  $\Delta\theta$ , увеличивая количество ГАП в антенне. Однако, учитывая ограниченный диаметр антенны  $D=\lambda/4$ , увеличить количество ГАП можно за счет уменьшения их размеров, что ведет к снижению их коэффициента акустико-электрического преобразования и, как следствие, к ужесточению требований к предварительным усилителям приемного тракта в части уровня собственных электрических шумов.

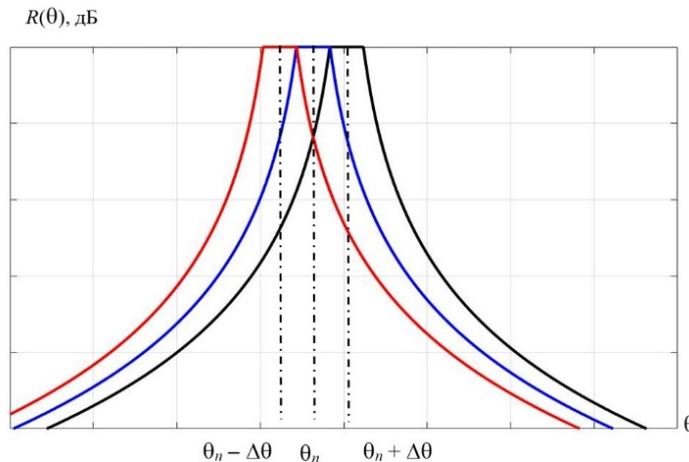


Рис. 7.

Точность определения направления  $\theta_{\text{ист}}$  может быть существенно повышена при ограниченных количествах ГАП и больших значениях  $\Delta\theta$ . Для этого при выборе по результатам анализа ПК<sub>n</sub> необходимо сопоставить между собой значения уровней сигналов  $U_{n-1}$  и  $U_{n+1}$  на выходах, соответственно, ПК<sub>n-1</sub> и ПК<sub>n+1</sub>, т. е. смежных с ПК<sub>n</sub> (см. рис. 6). Выполнение подобного сопоставления может быть реализовано благодаря монотонному характеру спада уровня сигнала в ПК за пределами сектора  $\theta \pm \Delta\theta/2$ . Действительно, если, например,  $U_{n-1} = U_{n+1}$ , то  $\theta_{\text{ист}} = \theta_n$ .

Зависимость значения  $\theta_{\text{ист}}$  от разности  $\Delta U = U_{n-1} - U_{n+1}$  может быть получена при анализе усеченных функций  $R_{\text{ок}}(\theta_n)$ ,  $R_{\text{ок}}(\theta_{n-1})$ ,  $R_{\text{ок}}(\theta_{n+1})$ , координат и уровней их пересечений.

В заключение следует отметить, что эффект от применения ПК, ДН которого имеет вид «обратной кардиоиды», при ориентировании его в направлении на источник сигнала, состоит в повышении выходного уровня как сигнала, так и помехи при сохранении их входного отношения. Подобные ПГС, учитывая незначительные размеры антенн, могут быть использованы на малогабаритных носителях, таких как подводные аппараты, буи, стационарные донные гидроакустические станции.

#### *Литература*

1. Справочник по гидроакустике / Под ред. А. Е. Колесникова. Л.: Судостроение, 1988.
2. Патент РФ №2439602, G01S7/52, публ. 27.08.2011.
3. Смартышев М. Д. Элементы теории направленности гидроакустических антенн. СПб: Изд-во «СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.

## ЦИФРОВОЙ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНЫЙ ПРИЁМНИК. ИСПЫТАНИЯ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

А. В. Боев, С. Н. Галий, В. К. Доля, канд. техн. наук, А. П. Ламека<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Л. А. Лукин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. А. Панич, д-р техн. наук, А. И. Чудаков<sup>1</sup>, канд. техн. наук  
Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ НКТЬ «Пьезоприбор», Ростов-на-Дону, Россия  
<sup>1</sup>ПАО «Дальприбор», Владивосток, Россия

## DIGITAL VECTOR-SCALAR RECEIVER. FIELD TESTS

A. V. Boev, S. N. Galiy, V. K. Dolya, Ph.D., A. P. Lameka<sup>1</sup>, Ph.D., L. A. Lukin<sup>1</sup>, Ph.D., A. A. Panich, Dr.Sc.,  
A. I. Chudakov<sup>1</sup>, Ph.D.  
Institute of Advanced Technologies and Piezotechnics SFedU, R&D Design Office «Piezopribor»,  
Rostov-on-Don, Russia  
<sup>1</sup>PJSC «Dalpribor», Vladivostok, Russia

*Представлены конструкция и экспериментальные результаты испытаний цифрового векторно-скалярного приёмника в режиме пеленгации источников акустических тональных и шумовых сигналов в условиях замкнутого мелкого водоёма и акватории залива Петра Великого. Произведена оценка собственных шумов приёмника, акваторий и других внешних источников по каналам колебательной скорости и акустического давления, определены пеленги на контрольный дрейфующий источник и на проходящие суда. Выполнена оценка погрешности определения пеленга.*

*The design and experimental results of tests of digital vector-scalar receiver in mode of direction finding of acoustic tonal and noise signal sources in closed shallow reservoir and water area of Peter the Great Bay. An assessment of the self-noise of the receiver, water areas and other external sources was made using the channels of vibrational velocity and acoustic pressure, bearings were determined for the control drifting source and for passing vessels. The error of determining the bearing has been evaluated.*

В настоящее время при построении малогабаритных широкополосных пассивных и активно-пассивных систем гидроакустического мониторинга акустической обстановки различных акваторий возрастает интерес к векторно-скалярным (комбинированным) приемникам [1–4]. В настоящей работе представлены результаты испытаний цифрового векторно-скалярного приемника (ЦВСП), проведенных в натуральных условиях залива Петра Великого. ЦВСП представляет собой металлический герметичный корпус, в котором размещены следующие узлы: скалярный приемник акустического давления, векторные приемники колебательной скорости (ПКС) каналов X и Y, плата обработки и управления, компасное устройство и система определения пространственного положения. Особенности конструкции, основные параметры и принципы функционирования ЦВСП приведены в [5].

Испытания ЦВСП проводились в составе автономного радиогидроакустического буйа РГБ-27 [6], состоящего из собственно комбинированного приемника [5], плавучего якоря-демпфера колебаний по глубине, кабельной катушки с блоком заглубления, поплавка и приемно-передающей радиоантенны. Заглубление ЦВСП при проведении испытаний менялось, но не превышало 300 м.

Задачи эксперимента:

- исследование общей шумовой картины акватории;
- регистрация акустических полей надводных и подводных источников шума, находящихся в процессе эксперимента в исследуемой акватории;
- определение пеленга на источники шума, включая акустический имитатор цели, координаты которого контролировались с помощью штатной навигационной системы.

Общая шумовая обстановка акватории регистрировалась по сигналу всенаправленного скалярного приемника, входящего в состав ЦВСП

Пеленг относительно направления на Северный магнитный полюс определялся автоматически следующим образом. На первом этапе на основе данных, получаемых от встроенных датчиков положения ЦВСП рассчитывалась поправка на отклонение от горизонтальной плоскости XY, в которой встроенные ПКС осуществляют преобразование колебательной скорости среды. Затем производится коррекция данных поступающих от ПКС в

соответствии с пространственным положением ЦВСП. Величина пеленга относительно Северного полюса вычислялась по известному алгоритму [6, 7].

Определение пеленга на находящиеся в акватории источники шума (надводные проходящие суда) осуществлялось после выделения соответствующих составляющих энергетического спектра источников.

На рис. 1 представлен пример спектрограммы сигнала, наблюдаемого на выходе приемника акустического давления ЦВСП. На спектрограмме отчетливо видны различные составляющие, уровни которых значительно превышают фоновый шум акватории. Частоты этих сигналов лежат в диапазоне 5...600 Гц и обусловлены особенностями собственных акустических шумов различных источников, которые на рисунке условно обозначены как «Цель 1», «Цель 2», «Цель 3». На рис. 1 также виден сигнал на частоте 1470 Гц, принадлежащий акустическому имитатору цели, координаты которого в процессе эксперимента постоянно контролировались спутниковой навигационной системой.

На рис. 2 представлен результат определения пеленга для частотного диапазона 2...100 Гц, для сигнала представленного на рис. 1. Указанные пеленги получены в результате обработки сигналов ЦВСП. Видно, что некоторые Цели имеют разные частотные составляющие спектра.

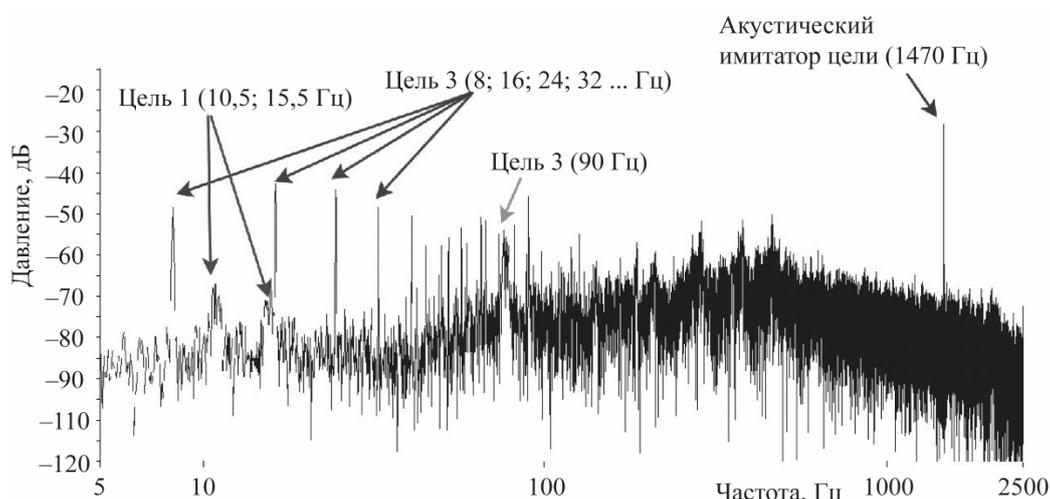


Рис. 1. Спектрограмма сигнала звукового канала ЦВСП.

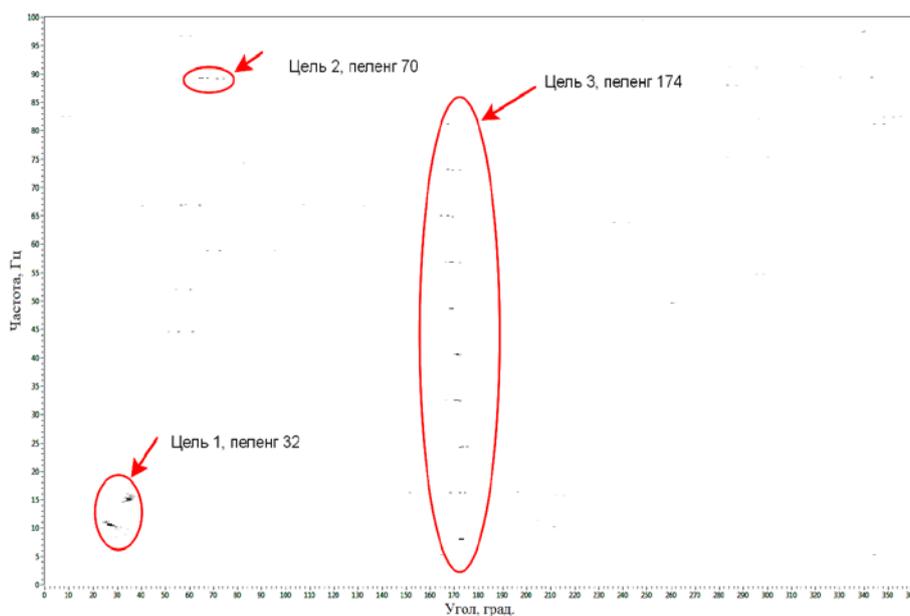


Рис. 2. Диаграмма пеленг-частота.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

На рис. 3 представлены результаты вычисления, текущего в течении 45 мин пеленга на акустический имитатор цели, полученные по информации ЦВСП и контрольной навигационной системы. Видно, что расхождение результатов не превышает 3°. На рис. 4 представлены координаты имитатора и ЦВСП, характеризующие взаимное изменяющееся во времени пространственное расположение ЦВСП и имитатора цели.

Дополнительные возможности по локации акустических целей появляются при совместной обработке данных от нескольких, разнесённых в пространстве акватории, ЦВСП. На рис. 5 приведен пример отображении данных по локации цели при помощи двух ЦВСП.

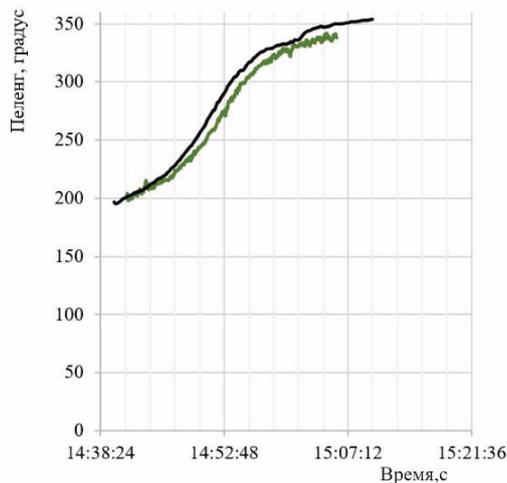


Рис. 3. Текущий пеленг на имитатор цели.

Зелёный — по ЦВСП; чёрный — навигационная система.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

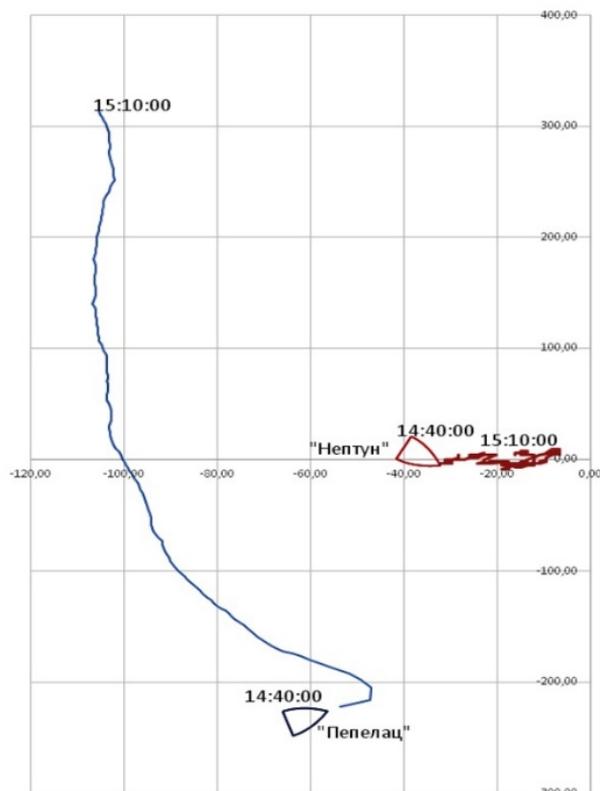
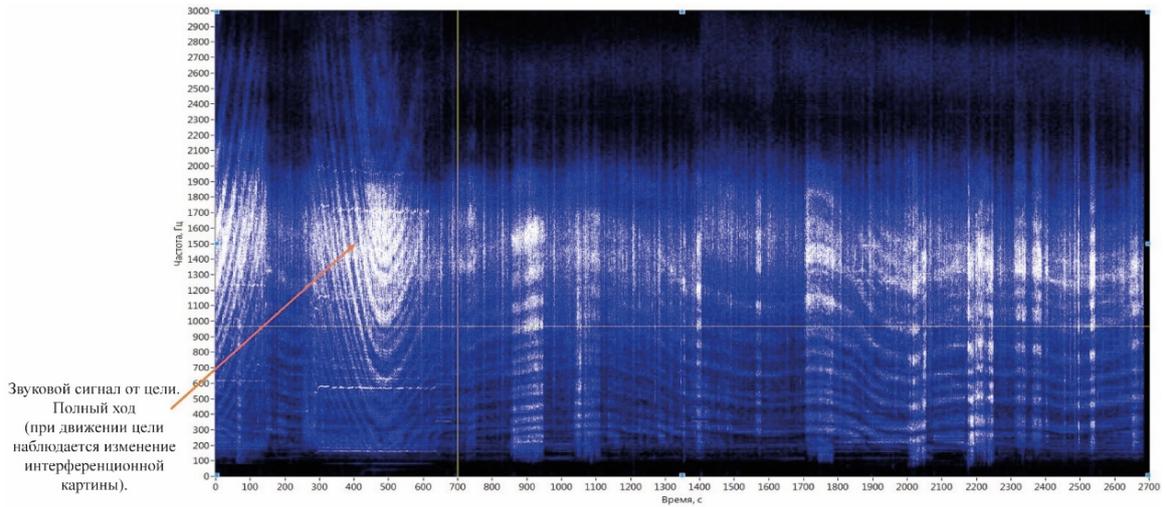
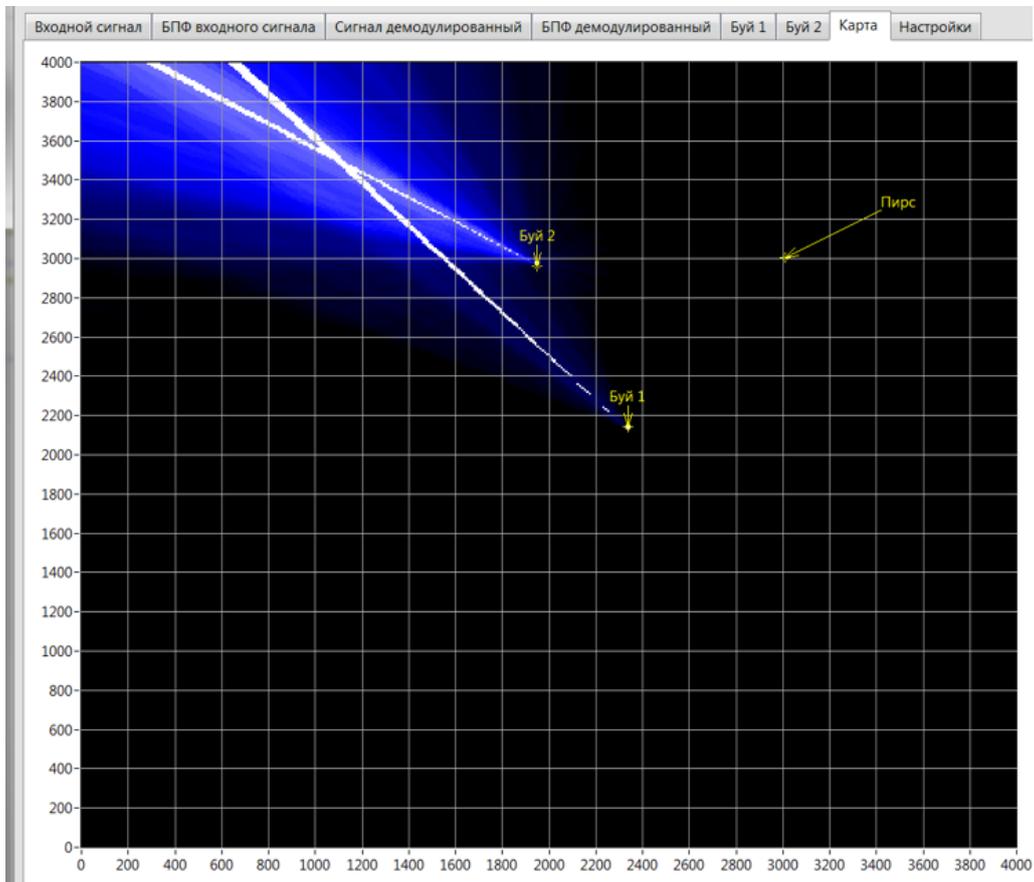


Рис. 4. Текущие координаты имитатора цели ЦВСП.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.



*a*



*b*

Рис. 5. Пример отображении данных.

*a* — спектрограммы, канал звукового давления (развертка по времени); *b* — карта расположения буев с отображение направления принимаемого акустического сигнала от цели

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

На карте направление прихода пеленгуемого сигнала от цели отображается лучами, сила цели кодируется яркостью луча (рис. 6) и также в виде гистограммы (пеленг–сила цели).

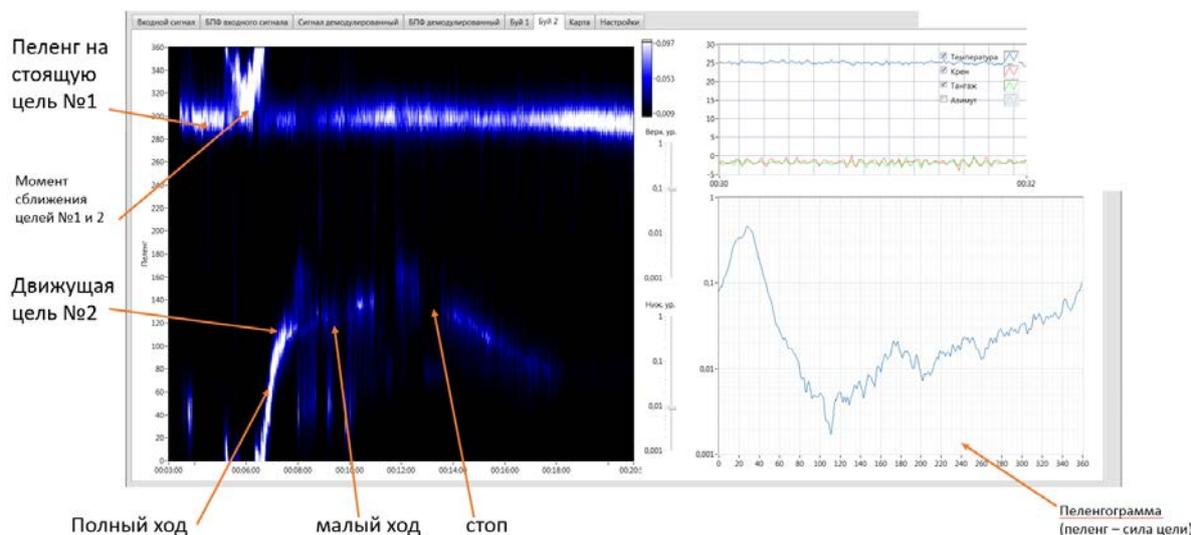


Рис. 6. Пример отображения пеленнограммы рассчитываемой по сигналам ЦВСП.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

На основе полученных данных показано, что в диапазоне частот 2...3000 Гц по каналам ПКС и акустического давления ЦВСП обладает низким уровнем собственных шумов, не превышающим уровень шумов моря при штиле, и динамическим диапазоном не менее 60 дБ. Погрешность определения пеленга относительно магнитного поля Земли по результатам построения вектора распространения акустического поля — не более 3 градусов.

#### Литература

1. Галий С. Н., Доля В. К., Боев А. В., Панич А. А. Векторно-скалярные приёмники как основа современных гидроакустических систем пассивного обнаружения подводных и надводных объектов // Тр. III молод. всерос. с междуна. участ. науч. конф., посв. 20-летию Факультета высоких технологий, 20–23 сентября 2021 г. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». Ростов-на-Дону: ООО «Фонд науки и образования», 2021. С. 28–36.
2. Crance J. L., Berchok C. L., Keating J. L. Gunshot call production by the North Pacific right whale *Eubalaena japonica* in the southeastern Bering Sea // *Endangered Species Research*. 2017. Vol. 34. P. 251–267.
3. Галий С. Н., Доля В. К., Боев А. В., Панич А. Е. Технические средства пространственного ориентирования робототехнических устройств морского базирования // Мат. XVI Всерос. науч.-практ. конф. и XII молодежной школы-семинара «Перспективные системы и задачи управления», п. Нижний Архыз — п. Домбай, 05–09 апреля 2021 г. Ростов-на-Дону: ИП Марук М. Р., 2021. С. 85–88.
4. Галий С. Н., Доля В. К., Боев А. В., Панич А. А., Ламека А. П. Цифровой векторно-скалярный приемник для гидроакустических исследований // Тр. XV Всерос. конф., Санкт-Петербург, 21–25 сентября 2020 г. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2020. С. 114–118.
5. Галий С. Н., Доля В. К., Боев А. В., Панич А. А., Ламека А. П. Цифровой векторно-скалярный приемник и гидроакустические системы обнаружения объектов на его основе // Сб. I Всерос. науч.-техн. конф., Анапа, 25 февраля 2021 г. «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Гидроакустические системы обнаружения объектов». Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2021. С. 95–100.
6. Скребнев Г. К. Комбинированные гидроакустические приемники. СПб.: Изд-во «Элмор».
7. Доля В. К., Галий С. Н., Ламека А. П., Панич А. Е. Оптимизация пьезоэлектрического преобразователя изгибного типа // *Инж. вест. Дона*. 2019. № 7(58). С. 6.

## ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛОКАТОРОВ ПРИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ В СОСТАВЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

*А. Ю. Дубровский, А. А. Покровский, канд. техн. наук, В. А. Сергеев, канд. техн. наук*  
 Филиал АО «Корпорация «Комета» – «НПЦ ОЭКН», Санкт-Петербург, Россия

## APPROACH TO THE VALIDATION OF THE PARAMETERS OF SONAR SYSTEMS WHILE OPERATING AS A PART OF A MULTIPLE SYSTEM

*A. Yu. Dubrovsky, A. A. Pokrovsky, Ph.D., V. A. Sergeev, Ph.D.*  
 Branch of JSC «Corporation «Kometa»-«NPC OECN», St. Petersburg, Russia

*На основе оценки показателей эффективности, характеризующих функционирование многопозиционных систем (МС), рассматривается вопрос обоснования параметров зондирующих сигналов, применяемых при использовании разнесённых гидролокаторов (ГАС). Предложен подход, позволяющий на основе анализа характеристик района и используемых гидролокаторов обосновывать рациональные параметры зондирующих сигналов.*

*Based on the assessment of performance indicators characterizing the functioning of multi-position systems (MS), the issue of substantiating the parameters of probing signals used when using spaced sonar systems (SS) is considered. An approach that makes it possible to validate the rational parameters of probing signals based on the analysis of the characteristics of the area and the used sonar systems is proposed.*

Актуальным вопросом при рассмотрении многопозиционных систем (МС) является оптимизация параметров отдельных ГАС при их совместной работе в составе МС [1–3]. Рассмотрим подход к выбору параметров ГАС при построении МС с использованием совокупности разнесённых автономных ГАС. Учитывая, что для автономных станций приоритетным параметром является количество энергии, расходуемое на решение задачи, в качестве критерия отбора параметров будем использовать условие:

$$E(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) = \min_{x_1 \in X_1; x_2 \in X_2; \dots; x_N \in X_N} E(x_1, x_2, \dots, x_N); \quad (1)$$

$$P_{обн} \geq P_{обн\ зад},$$

где  $x_i^*$  — вектор оптимальных параметров  $i$ -той ГАС;  $x_i$  — вектор оптимизируемых параметров  $i$ -той ГАС;  $N$  — число ГАС;  $P_{обн\ зад}$  — заданная вероятность обнаружения целей в районе;  $X_i$  — множество допустимых значений оптимизируемых параметров  $i$ -той ГАС.

Поставленная задача не всегда имеет решение. Может оказаться, что площадь заданного района настолько велика, что выделенного количества ГАС будет недостаточно для выполнения условия  $P_{обн} \geq P_{обн\ зад}$  даже при использовании сигналов, обладающих максимальной энергией. В этом случае задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом:

$$P(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) = \max_{x_1 \in X_1; x_2 \in X_2; \dots; x_N \in X_N} P(x_1, x_2, \dots, x_N); \quad (2)$$

$$E \leq E_{зад}.$$

Оптимизируемыми параметрами являются: тип сигнала, мощность и сектор излучения. Каждый набор параметров ГАС  $x_1, x_2, \dots, x_N$  определяет вариант функционирования МС и характеризуется полем вероятностей обнаружения в районе и суммарным расходом энергии. Значение показателей зависит от гидролого-акустических условий, поэтому необходимо выполнить комплекс расчётов, связанный с расчётом аномалии распространения в узлах пространственной сетки, уровней сигналов заданных классов в различных режимах работы ГАС, уровней реверберационной помехи для используемых типов сигналов, вероятностей обнаружения в заданных узлах пространственной сетки. Такие расчеты необходимо выполнять для каждого варианта функционирования МС. Общее число вариантов функционирования МС при этом равно

$$N_{var} = \prod_{k=1}^N Card(X_k), \quad (3)$$

где  $Card(X_k)$  — мощность множества  $X_k$ .

Для однотипных ГАС будем иметь  $N_{var} = (Card(X_k))^N$ .

В качестве примера рассмотрим вариант, когда число типов сигналов  $N_s = 20$ , число градаций мощности  $N_p = 3$ , число секторов излучения  $N_q = 6$ , число ГАС  $N_{pg} = 5$ . Тогда количество вариантов будет равно  $N_{var} = (N_s \cdot N_p \cdot N_q)^{N_{pg}} = 360^5 \approx 6 \cdot 10^{12}$ . Даже если расчет одного варианта занимает 1 мс, то расчет всех вариантов займёт более 194 лет. Из этого следует, что строгое решение задачи оптимизации параметров ГАС практически недостижимо. Практически выбор рациональных параметров может быть осуществлён путём приближенного решения задачи (1). Суть метода решения задачи заключается в сужении области допустимых значений параметров и в применении итерационной процедуры поиска экстремума. Сужение области допустимых значений параметров ГАС осуществляется на основе общих принципов, касающихся эффективности функционирования бистатических систем гидролокации (БС), которые по мнению авторов, сводятся к следующему.

1. Оптимальный тип сигнала конкретной ГАС в заданных ГАУ при ее работе в режиме БС совпадает с оптимальным типом сигнала при ее работе в моностатическом (МНС) режиме. Данное положение позволяет решать задачу выбора оптимального сигнала для каждой ГАС автономно, независимо от других ГАС.

2. Если дальность действия активной ГАС в МНС меньше  $1,7 B$ , где  $B$  — бистатическая база — расстояние до соседней ГАС, предназначенной для работы в БС, то данная бистатическая система неэффективна. Для повышения ее эффективности необходимо использовать сигналы с большей энергетикой. Данное положение накладывает ограничение снизу на энергию сигналов и позволяет исключить сигналы, не обеспечивающие в заданных ГАУ дальность, необходимую для эффективного функционирования ГАС в БС.

3. Если дальность действия активной ГАС в МНС больше  $3 B$ , то зона обнаружения ГАС в МНС практически покрывает зону обнаружения бистатической системы, в результате чего прирост эффективности МС за счет БС незначителен. Данное положение используется при ранжировании ГАС по их вкладу в общую эффективность.

4. Если ГАС равномерно распределены в заданном районе, то оптимальным с точки зрения минимизации расхода энергии в любых гидролого-акустических условиях является экстенсивный путь решения задачи вскрытия обстановки в районе. Смысл этого утверждения заключается в том, что чем больше используется активных ГАС, тем меньше суммарный расход энергии при заданном уровне эффективности.

Рассмотрим МС с равномерным расположением ГАС внутри района. Тогда для общего количества энергии, необходимого на освещение обстановки можно записать:

$$E_{sum}(E_c) = E_c \cdot N_{ГАС}(D(E_c)) \approx \frac{E_c \cdot S}{\pi \cdot D^2(E_c)}, \quad (4)$$

где  $E_c$  — энергия сигнала, равная произведению длительности сигнала на квадрат среднеквадратического значения давления сигнала;  $S$  — площадь района;  $D^2(E_c)$  — дальность ГАС.

Энергия сигнала и дальность действия ГАС связаны известным уравнением дальности. Для определения экстремума функции  $E_{sum}(E_c)$  вычислим ее производную по  $E_c$ :

$$\frac{dE_{sum}(E_c)}{dE_c} = \frac{S}{\pi \cdot (D(E_c))^2} \cdot \left(1 - \frac{2E_c}{D(E_c)} \cdot \frac{dD}{dE_c}\right) = \frac{S}{\pi \cdot (D(E_c))^2} \cdot \left(1 - 2E_c \cdot \frac{d(\ln D(E_c))}{dE_c}\right). \quad (5)$$

Можно показать, что второй член в круглой скобке с увеличением  $E_c$  монотонно убывает до 0, причем его максимальное при  $E_c \rightarrow 0$  равно 0,5. Производная величины  $E_{sum}(E_c)$  представляет собой неотрицательную монотонно убывающую функцию, следовательно, функция  $E_{sum}(E_c)$  не имеет экстремума, а ее наименьшее значение соответствует минимально возможному значению  $E_c$ , которое зависит от заданного количества ГАС.

Поэтому при выборе параметров сигналов, необходимо стремиться к использованию всех выделенных для решения задачи ГАС.

5. Целесообразный вариант функционирования ГАС в МС характеризуется равномерным распределением энергетического потенциала ГАС по площади района. Этот принцип позволяет получить количественный критерий для распределения энергии по ГАС.

Критерием равномерности распределения энергетического потенциала может служить следующее правило: приращение эффективности при увеличении энергии сигнала на фиксированную величину должно быть примерно одинаковым для всех ГАС. Если это не выполняется, т.е. увеличение энергии сигнала в одной из ГАС приводит к существенному повышению эффективности системы в целом, то это означает, что суммарная энергия может быть перераспределена так, что при сохранении показателей эффективности на том же уровне можно добиться снижения суммарного расхода энергии.

Сформулированные выше принципы могут быть положены в основу алгоритма выбора параметров зондирующих сигналов, включающего следующие процедуры:

- выбор оптимального типа сигнала для каждой ГАС;
- ранжирование ГАС по их вкладу в значение основного показателя эффективности;
- выбор рациональных параметров, обеспечивающих максимальное значение заданного показателя эффективности.

Задача выбора типа сигнала для каждой ГАС решается путем отбора сигналов с использованием энергетического, структурного и функционального критериев. Сущность энергетического критерия заключается в следующем. Каждый сигнал характеризуется энергией, равной квадрату среднеквадратического давления сигнала на длительность и однозначно определяющей энергетическую дальность обнаружения ГАС (дальность обнаружения в однородной безграничной среде). В реальной среде с учетом аномалии распространения дальность обнаружения может значительно отличаться от энергетической, как в большую, так и в меньшую сторону. Относительное увеличение энергии сигнала, необходимое для увеличения дальности обнаружения в  $k$  раз в однородной безграничной среде рассчитывается по формуле:

$$E_0(r, k, f) = k^4 \cdot 10^{0,0002 \cdot r \cdot (k-1) \cdot \beta(f)}, \quad (6)$$

где  $r$  — дистанция, м;  $f$  — частота сигнала, кГц;  $\beta(f)$  — коэффициент пространственного затухания звука в водной среде. С учетом аномалии распространения  $A(r, z)$  формула (1) примет вид:

$$E(r, k, f, z) = \frac{A(r, z)}{A(k \cdot r, z)} \cdot k^4 \cdot 10^{0,0002 \cdot r \cdot (k-1) \cdot \beta(f)}. \quad (7)$$

Согласно энергетическому критерию, все сигналы ранжируются по величине

$$\delta E(D_3, f, z) = \frac{E_0(D_3, 2, f, z)}{E(D_3, 2, f, z)}. \quad (8)$$

Величина  $\delta E(D_3, f, z)$  показывает во сколько раз энергия данного сигнала в заданных гидролого-акустических условиях меньше по сравнению с условиями безграничной однородной среды, при одинаковой дальности действия. В неблагоприятных условиях предпочтение должно отдаваться сигналам с малой энергией, а в благоприятных, напротив, — наиболее энергоемким сигналам. Структурный критерий используется для отбора сигналов с учетом реверберации:

$$P_p(D_p, f, \Delta f) < \mu \cdot P_{\text{шп}}(D_p, f, \Delta f), \quad (9)$$

где  $P_p(D_p, f, \Delta f)$  — давление реверберационной помехи в рабочей полосе ГАС;  $P_{\text{шп}}(D_p, f, \Delta f)$  — давление шумовой помехи в рабочей полосе ГАС;  $D_p$  — расчетная дальность обнаружения без учета реверберационной помехи;  $\mu$  — определяет запас помехоустойчивости по отношению к реверберации;  $\Delta f$  — рабочая полоса ГАС. Если данный критерий не выполняется ни для одного сигнала, то выбирается сигнал, для которого отношение энергии реверберационной помехи, к энергии сигнала минимально. Функциональный критерий используется, если в результате

предшествующего отбора осталось более одного сигнала и заключается в выборе сигнала, который при прочих равных условиях обеспечивает наибольшую дальность. Задача ранжирования ГАС по степени вклада в основной показатель эффективности решается итерационным методом, причем каждая итерация завершается выбором очередного члена вариационного ряда, упорядоченного по убыванию основного показателя эффективности.

В процессе первой итерации выполняется цикл по всем ГАС. Для каждой ГАС выполняется внутренний цикл по всем секторам излучения. Внутри каждого цикла определяется значение основного показателя эффективности решаемой ТЗ (освещаемая площадь или длина освещаемого рубежа). В рассматриваемом варианте МС будем считать, что зондирующий сигнал излучается в одном секторе, а прием эхосигналов осуществляется всеми ГАС. Для каждой ГАС используется сигнал, с максимальным рангом, определенном на первом этапе. В результате определяется номер ГАС и номер сектора излучения (направление излучения), которые дают максимальный вклад в эффективность решения задачи. В случае, если рассматривается одна глубина погружения цели, то для выбора параметров решается следующая экстремальная задача:

$$P_1(j_1, n_1) = \max_{1 \leq n \leq N_{\text{ГАС}}} \left\{ \max_{1 \leq j \leq N_s} \{P_{\varepsilon_{j,n}}\} \right\}, \quad (10)$$

где  $N_{\text{ГАС}}$  — число ГАС;  $N_s$  —  $N_{\text{ГАС}}$  — число секторов излучения в каждой ГАС;  $P_{\varepsilon_{j,n}}$  — значение показателя эффективности для  $n$ -й ГАС и  $j$ -го сектора излучения.

Для расчета основного показателя эффективности вся область возможного места цели покрывается пространственной сеткой с заданным шагом по  $x$  и по  $y$ . В каждом узле сетки рассчитывается вероятность обнаружения цели с учетом совместного действия всех ГАС. Для расчета совместной вероятности обнаружения используется правило «1 из  $N$ ». Это означает, что цель считается обнаруженной, если она обнаруживается хотя бы одной ГАС. Вероятность правильного обнаружения цели в заданной точке при использовании правила «1 из  $N$ » рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{ПО}}^{(1)}(r_k, j_1, n_1) = 1 - \prod_{n=1}^{N_{\text{ГАС}}} [1 - \beta_n(r_k, j_1, n_1)], \quad (11)$$

где  $\beta_n(r_k, j_1, n_1)$  — вероятность правильного обнаружения цели  $n$ -й ГАС в  $k$ -й узловой точке, где  $r_k$  — радиус вектор  $k$ -й узловой точки.

Площадь освещаемого района определяется как суммарная площадь элементарных ячеек, для которых выполняется условие:

$$(s_k \in S_{\text{зад}}) \wedge (P_{\text{ПО}}^{(1)}(r_k, j_1, n_1) \geq P_{\text{зад}}), \quad (12)$$

где  $s_k$  — элементарная ячейка, соответствующая  $k$ -той узловой точке;  $S_{\text{зад}}$  — заданная область;  $P_{\text{ПО}}(r_k)$  — вероятность обнаружения цели в элементарной ячейке;  $P_{\text{зад}}$  — заданная вероятность обнаружения цели. Обозначим указанную площадь  $S_1$ . Коэффициенту усиления полученного излучателя присваивается значение единица. В процессе второй итерации осуществляется перебор всех секторов излучения для всех ГАС, кроме сектора, определенного на первой итерации, и для каждого варианта рассчитывается приращение основного показателя эффективности. В результате определяется второй излучатель, который вносит максимальный вклад в эффективность решения задачи. В общем случае этот излучатель может принадлежать любой ГАС, в частности и той, которая была выбрана на первой итерации. Приращение показателя эффективности за счет использования второго излучателя рассчитывается по формуле:

$$\Delta S_2 = S_2 - S_1, \quad (13)$$

где  $S_1$  — площадь, освещаемая первым излучателем;  $S_2$  — площадь, освещенная совместным действием первого и второго излучателя.

Для расчета площади  $S_2$  в каждой элементарной ячейке вычисляется кумулятивная вероятность обнаружения цели за первые два цикла «излучение–прием». Формула для расчета кумулятивной вероятности обнаружения имеет вид:

$$P_{\text{ПО}}^{(2)}(r_k, j_2, n_2) = 1 - \left(1 - P_{\text{ПО}}^{(1)}(r_k, j_1, n_1)\right) \prod_{n=1}^{N_{\text{ГАС}}} [1 - \beta_n(r_k, j_2, n_2)]. \quad (14)$$

Площадь  $S_2$  определяется как суммарная площадь элементарных ячеек, для которых выполняется условие:

$$(S_k \in S_{\text{зад}}) \wedge (P_{\text{ПО}}^{(2)}(r_k, j_2, n_2) \geq P_{\text{зад}}). \quad (15)$$

На  $m$ -ом шаге определяется очередной член вариационного ряда — следующий излучатель, обеспечивающий максимальный прирост эффективности  $\Delta S_m = S_m - S_{m-1}$ . Формула для расчёта кумулятивной вероятности обнаружения в этом случае имеет вид:

$$P_{\text{ПО}}^{(m)}(r_k, j_m, n_m) = 1 - \prod_{m=1}^{m-1} \left(1 - P_{\text{ПО}}^{(m)}(r_k, j_m, n_m)\right) \times \prod_{n=1}^{N_{\text{ГАС}}} [1 - \beta_n(r_k, j_2, n_2)]. \quad (16)$$

Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто заданное значение эффективности. Выбор рациональных параметров функционирования осуществляется путем объединения параметров ГАС, полученных в результате описанного итерационного процесса. Таким образом, на примере задачи вскрытия обстановки рассмотрен подход к построению итерационного алгоритма выбора параметров зондирующих сигналов для использования в многопозиционных системах освещения обстановки, который основан на минимизации общей излучаемой энергии.

#### *Литература*

1. Машошин А. И. Исследование эффективности применения бистатической гидролокации // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-История. 2014. С. 358–360.
2. Коваленко В. В., Лучинин А. Г. и др. Принципы и методы адаптированного к изменчивости среды мультистатического наблюдения // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-История. 2014. С. 412–415.
3. Коваленко В. В., Лучинин А. Г. и др. Принципы организации акустических систем подводного наблюдения. Барьеры, зоны, мультистатика // Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Нестор-История. 2014. С. 25–29.

## ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТУРЫ СЕТЕВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ РЕШЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

*А. И. Машошин*, д-р техн. наук, *Ю. М. Скородумов*, канд. техн. наук  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## VALIDATION OF THE NETWORK HYDROACOUSTIC COMMUNICATION EQUIPMENT CHARACTERISTICS PROVIDING THE SOLUTION OF PRACTICAL PROBLEMS

*A. I. Mashoshin*, Dr.Sc., *Yu. M. Skorodumov*, Ph.D.  
JSC «Concern «CSRI «Elektroprigor», St. Petersburg, Russia

*В работе обосновываются характеристики аппаратуры сетевой гидроакустической связи (предельное количество абонентов сети, дальность действия, точность взаимного позиционирования абонентов), вытекающие из практических задач, при решении которых применение аппаратуры сетевой гидроакустической связи является необходимым условием. К таким задачам относятся: поиск подводных объектов при помощи стационарной и мобильной распределённых систем подводного наблюдения, борьба с минной опасностью, поиск затонувших объектов, сейсморазведка залежей углеводородов на морском шельфе.*

*The paper validates the characteristics of the network hydroacoustic communication equipment (maximum number of the network subscribers, communication range, accuracy of the mutual positioning of subscribers) arising from practical problems in solving which the use of network hydroacoustic communication equipment is necessary. Such tasks include: searching for underwater objects using stationary and mobile distributed underwater surveillance systems, mine danger combating, searching for sunken objects, seismic exploration of hydrocarbon deposits on the offshore shelf.*

**Введение.** Одним из направлений развития гидроакустической связи является переход от связи между двумя абонентами к сетевой гидроакустической связи (СГС), обеспечивающей обмен сообщениями одновременно между несколькими абонентами сети и их высокоточное взаимное позиционирование [1]. Данный вид связи интенсивно развивается за рубежом [2]. В работе [3] подробно изложены пути решения технических проблем создания эффективной СГС. Целью работы является обоснование основных технических характеристик аппаратуры СГС, обеспечивающей решение практических задач. К этим характеристикам относятся: количество абонентов сети, максимальное расстояние между абонентами, дальность действия СГС, точность взаимного позиционирования абонентов.

Далее приводится рассмотрение ряда актуальных практических задач, для решения которых необходимо применение СГС, и вытекающих из существа этих задач основных технических характеристик аппаратуры СГС.

**Создание стационарных распределённых систем подводного наблюдения.** Современный этап развития систем освещения подводной обстановки характеризуется переходом от стационарных гидроакустических комплексов с антеннами большой апертуры (типа системы SOSUS ВМС США) к системам, объединяющим на основе сетевой организации пространственно распределённые малогабаритные быстро развёртываемые средства подводного наблюдения [4]. В отечественной литературе такие системы получили название «распределённые системы подводного наблюдения» (РСПН).

РСПН могут быть стационарными, состоящими из автономных заякоренных малогабаритных гидроакустических станций, и мобильными, построенными на базе автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Мобильные РСПН могут быть развёрнуты в любых районах Мирового океана в отличие от стационарных РСПН, которые могут быть позиционированы только в мелководных морях.

Основным достоинством РСПН по сравнению со стационарными гидроакустическими комплексами с антеннами большой апертуры является устойчивость к преднамеренному противодействию со стороны противника, обеспечиваемая скрытностью установки её элементов и их пространственным разнесением.

Эффективность функционирования РСПН достигается за счет интеграции всех средств подводного наблюдения, входящих в её состав, на основе реализации принципа единого информационного пространства с использованием сетевой гидроакустической связи [5].

В состав типовой стационарной РСПН входят пространственно-разнесённые [6]:

- пассивные автономные гидроакустические станции (АГС), осуществляющие обнаружение подводных объектов в режимах шумопеленгования и мультистатической гидролокации;
- активные автономные излучатели подсветки (АИП), обеспечивающие работу РСПН в режиме мультистатической гидролокации;
- автономные станции измерения вертикального распределения скорости звука (СИСЗ) в интересах адаптации РСПН к текущим гидроакустическим условиям;
- радиогидроакустические буи (РГБ) для передачи на командный пункт по радио (спутниковому) каналу связи результатов подводного наблюдения и диагностики подводных элементов системы, а также для получения от командного пункта управляющих команд;
- автономные гидроакустические ретрансляторы (АГР), совместно с перечисленными элементами образующие сетевую подводную систему обмена данными между элементами РСПН;
- командный пункт (КП) РСПН, расположенный на берегу либо на мобильном носителе и осуществляющий анализ информации, поступающей от АГС, и управление работой всех элементов РСПН.

Все подводные элементы РСПН оборудуются аппаратурой СГС, обеспечивающей обмен данными между ними и КП. Оборудование освещаемого района произвольной площади подводными элементами РСПН осуществляется путём разбиения района на квадраты с типовым оборудованием каждого квадрата. Расчёты показывают [6], что для освещения подводной обстановки в каждой точке квадрата  $50 \times 50$  км с вероятностью 0,9 элементарная ячейка должна содержать 4 АИП, 9 АГС, 10 АГР, 1 СИСЗ, 1 РГБ. При этом расстояние между соседними подводными элементами РСПН не должно превышать 10 км.

Таким образом, аппаратура СГС, обеспечивающая функционирование РСПН, должна быть ориентирована на обслуживание 30–100 абонентов, находящихся на расстоянии до 10 км друг от друга. Требования к точности взаимного позиционирования абонентов сети в данном случае не предъявляются.

**Создание мобильных распределённых систем подводного наблюдения.** В мобильных РСПН поиск подводных объектов осуществляют АНПА, которые в зависимости от решаемой задачи могут функционировать в пассивном либо активном режиме [7, 8].

При этом необходимым условием эффективного освещения подводной обстановки является применение АНПА тяжёлого класса, оборудованных широкоапертурными антеннами и аппаратурой СГС с дальностью связи не менее 30 км.

Выполненное моделирование [8] привело к выводу, что для поиска подводных объектов в пассивном режиме целесообразно каждому АНПА выделять индивидуальный район размером  $20 \times 20$  км, в котором АНПА должен маневрировать способом, учитывающим имеющуюся информацию о вероятном курсе объекта поиска.

Для поиска в активном режиме наиболее эффективно каждой паре АНПА выделять район размером  $50 \times 50$  км, в котором они должны двигаться по окружности диаметра 25–30 км, находясь на концах одного диаметра, поочередно излучая зондирующие сигналы, реализуя тем самым режимы моно и бистатической гидролокации.

АНПА, обнаруживший объект поиска, не прерывая слежение, передаёт сообщение об обнаружении по СГС другим АНПА. АНПА, получившие это сообщение, одним из способов (ретрансляция с использованием СГС, всплытие и передача по радиоканалу) доводят его до КП. Также от КП АНПА получают указание о дальнейших действиях.

Аппаратура СГС, обеспечивающая функционирование мобильной РСПН, должна быть ориентирована на обслуживание до 20 абонентов, находящихся на расстоянии до 30 км друг от друга, при точности взаимного позиционирования 100–200 м.

**Борьба с минной опасностью.** Минная опасность на море возникает как следствие войн, локальных конфликтов и угрозы их возникновения. Ввиду этого борьба с минной опасностью

актуальна как в военное время, так и в мирное время после завершения конфликтов. Для борьбы с минной опасностью традиционно использовались тральщики. Однако ввиду изобретения мин, устойчивых к тралению, в последние десятилетия на их место пришли противоминные корабли, которые, не отказываясь от траления, ориентированы, в первую очередь, на поиск и уничтожение отдельных мин [9].

АНПА можно рассматривать в качестве дальнейшего развития средств борьбы с минной опасностью, поскольку они имеют ряд преимуществ перед противоминными кораблями:

- исключают гибель людей при взрыве мины;
- обладают более низким уровнем физических полей, на которые реагируют взрыватели морских мин;

- способны маневрировать на оптимальной глубине для поиска и классификации мин.

Борьба с минной опасностью включает решение двух задач:

- поиск и уничтожение мин в заминированном районе;
- обеспечение проводки судов (включая подводные лодки) через заминированный район.

В основе решения этих задач лежит обнаружение морских мин (в том числе, заиленных) с использованием гидроакустической, электромагнитной и телевизионной аппаратуры. Однако, учитывая, что скорость АНПА при поиске составляет единицы узлов, а дальность действия средств поиска не превышает несколько сотен метров, поисковая производительность при решении перечисленных задач очень мала. Из этого следует естественный вывод о целесообразности группового применения АНПА.

Аппаратура СГС при групповом применении АНПА при поиске мин играет ключевую роль, поскольку обеспечивает слаженное взаимодействие АНПА и контроль их текущего взаимного положения. Расчёты показывают, что в этом случае аппаратура СГС должна быть ориентирована на обслуживание до 10 абонентов, находящихся на расстоянии до 2 км друг от друга, при точности взаимного позиционирования 5–10 м. При этом дальность СГС для связи с командным пунктом должна быть не менее 5 км. Кроме поиска мин те же АНПА могут быть применены для поиска затонувших кораблей, самолётов, а также для инспекции объектов подводной инфраструктуры, таких как трубопроводы, кабели и др.

**Сейсморазведка углеводородов в труднодоступных районах Мирового океана.** Стратегически важной национальной задачей является поиск месторождений залежей углеводородов на морском шельфе Арктики. Основным методом решения этой задачи является сейсморазведка. Её суть заключается в излучении в воду мощных низкочастотных акустических сигналов, которые проникают в грунт и отражаются от различных неоднородностей в грунте, в том числе от полостей (линз), содержащих залежи углеводородов. Отраженные сигналы фиксируются полем донных станций, оборудованных геофонами, либо протяженными линейными многоэлементными антеннами (сейсмокосами), буксируемыми за судном, либо сейсмокосами, лежащими на дне. Для решения всех перечисленных задач используется специально оборудованные суда, которые способны буксировать излучатель и сейсмокосу, а также ставить и впоследствии поднимать на борт донные станции.

Способы сейсморазведки не применимы в районах, покрытых льдом. Также они не применимы в штормовую погоду. В морях Российской части Арктики благоприятная для сейсморазведки погода стоит суммарно не более нескольких месяцев в году, что делает сейсморазведку с использованием надводных судов экономически не эффективной.

Выходом из данной ситуации является создание подводных робототехнических комплексов (РТК) для поиска и добычи углеводородов на морском шельфе. Работы по созданию РТК активно ведутся в России [10] и за рубежом [11].

Подводный РТК для сейсморазведки на морском шельфе должен включать:

- комплект АНПА портативного класса (по разным оценкам включающий от нескольких сотен до нескольких тысяч АНПА), оснащенных средствами автономной навигации, геофонами, короткими сейсмокосами (стримерами) с датчиками-гидрофонами, а также аппаратурой СГС;
- подводную док-станцию (т.е. специализированную подводную лодку), обеспечивающую доставку АНПА в район проведения работ, управление ими, а также буксировку низкочастотных гидроакустических излучателей;
- береговую инфраструктуру для обслуживания АНПА и док-станции.

Аппаратура СГС в работе РТК обеспечивает доведения до АНПА команд управления, а также высокоточное (с точностью до нескольких десятков сантиметров) взаимное позиционирование АНПА. Она должна быть рассчитана на обслуживание до 1000 абонентов, находящихся друг от друга на расстоянии до 500 м. При этом дальность действия СГС для получения команд от системы управления РТК должна быть не менее 2 км. Точность взаимного позиционирования АНПА должна составлять 5-10 см.

**Заключение.** При решении практических задач, рассмотренных в работе, аппаратура сетевой гидроакустической связи играет одну из ключевых ролей: она обеспечивает информационный обмен между абонентами сети, а также их взаимное позиционирование.

В табл. 1 приведены характеристики аппаратуры сетевой гидроакустической связи, обеспечивающей решение рассмотренных практических задач.

Таблица 1

Характеристики аппаратуры сетевой гидроакустической связи, обеспечивающей решение рассмотренных практических задач

| Решаемая задача                                  | Количество абонентов сети | Максимальное расстояние между абонентами, км | Дальность действия СГС, км | Точность взаимного позиционирования абонентов, м |
|--------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|
| Освещение подводной обстановки стационарной РСПН | 30–100                    | 10                                           | 10                         | –                                                |
| Освещение подводной обстановки мобильной РСПН    | 8–20                      | 30                                           | 30                         | 100–200                                          |
| Поиск донных объектов                            | 5–10                      | 2                                            | 5                          | 5–10                                             |
| Сейсморазведка                                   | 100–1000                  | 0,5                                          | 2                          | 0,05–0,1                                         |

### Литература

1. Машошин А. И., Пашкевич И. В. Пути совершенствования гидроакустической связи // Морская радиоэлектроника. 2020. № 3 (73). С. 26–29.
2. Akyildiz I. F., Pompili D., Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges. Ad Hoc Networks, 2005. Vol. 3, № 3. P. 257–279.
3. Кебкал К. Г., Машошин А. И., Мороз Н. В. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, №2 (105). С. 106–135.
4. Пешехонов В. Г., Брага Ю. А., Машошин А. И. Сетецентрический подход к решению проблемы освещения подводной обстановки в Арктике // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2012. № 3. С. 219–227.
5. Брага Ю. А., Машошин А. И. Место сетевой подводной системы обмена данными в интегрированной сетецентрической системе подводного наблюдения // Сб. VI научно-практической конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения». Волгоград. 2013. С. 55–61.
6. Машошин А. И. Оценка эффективности стационарной распределённой системы подводного наблюдения // Морской сборник. 2020. № 4. С. 65–69.
7. Спорышев М. С., Щербатюк А. Ф. Об использовании групп морских роботов для охраны водных акваторий: краткий обзор // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2(26). С. 21–27.
8. Машошин А. И. Методы поиска подводных объектов мобильной распределённой системой подводного наблюдения // Гидроакустика. 2020. № 3 (43). С. 66–72.
9. Jane's fighting ships. 2019-2020. Ed. Alex Pape. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK. 2020.
10. Лавёров Н. П., Рослов Ю. В., Тулупов А. В., Воронов М. А., Лобковский Л. И., Ганжа О. Ю. Перспективы донной сейсморазведки в РФ // Морские информационно-управляющие системы. 2015. № 1 (7). С. 40–51.
11. Pleskach M. WiMUST – A fleet of AUVs for seismic surveys // Hydro International. 2017.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

## ОРГАНИЗАЦИЯ СТЕНДА ОТЛАДКИ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

*A. B. Шафранюк*, канд. техн. наук

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## ORGANIZATION OF THE STAND FOR DEBUGGING UNDERWATER ENVIRONMENT SURVEILLANCE SYSTEMS

*A. V. Shafranyuk*, Ph.D.

JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

*Рассматривается опыт разработки имитационной части стенда сопровождения и отладки алгоритмического и программного обеспечения гидроакустических систем. Приводятся временные характеристики имитационного программного обеспечения, общие подходы к организации и моделированию, формированию отладочных данных. Приводится оценка характеристик основной части имитационного программного обеспечения, осуществляющей генерацию сигналов по выходам антенных решёток. Дается оценка возможности построения таких моделей, работающих в реальном времени.*

*The experience of developing the simulation part of the support stand and debugging the algorithmic and software of hydroacoustic systems is considered. The temporal characteristics of the simulation software, general approaches to organization and modeling, and the formation of debugging data are given. An assessment of the characteristics of the main part of the simulation software that generates signals from the outputs of antenna arrays is given. An assessment of the possibility of constructing such models that work in real time is given.*

**Введение.** Современные гидроакустические станции (ГАС) являются сложными программно-алгоритмическими системами. Основные затраты при их разработке относятся к отладке штатного программного обеспечения (ПО). При этом собственно отладка состоит из двух основных этапов: стендовой разработки ПО и морской отработки этого ПО. Таким образом, чем более качественно будет проведена отработка штатного ПО ГАС на стенде, тем меньшими будут как затраты на этапе морской отработки, так и во время собственно разработки ГАС. Качество отладки программного обеспечения на стенде определяется в свою очередь адекватностью [1] имитационного обеспечения и его номенклатурой [2]. Таким образом стендовое имитационное ПО является ключевым моментом в разработке ГАС, которое позволяет снизить его себестоимость и время разработки.

Условно, по этапам жизненного цикла изделия можно выделить следующие области применения ПО (табл. 1).

Таблица 1

Применимость имитационного ПО на этапах жизненного цикла ГАС

| № п/п | Наименование этапа              | Назначение имитационного ПО                                                                                                              |
|-------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | НИР, аванпроект                 | – Разработка концепции ГАС;<br>– формирование технического задания;<br>– оценка эффективности ГАС в различных условиях функционирования. |
| 2     | Техническое проектирование      | – Разработка алгоритмов функционирования;<br>– разработка системы отображения и управления.                                              |
| 3     | Рабочее проектирование          | – Разработка и отладка штатного ПО.                                                                                                      |
| 4     | Испытания                       | – Проведение стендовых испытаний.                                                                                                        |
| 5     | Сопровождение серийного изделия | – Доработка и корректировка ПО;<br>– коррекция моделей и их параметров, используемых в штатном ПО.                                       |

Рассмотрим далее сложившуюся в результате разработке имитационную систему стенда, а также характеристики, на которые удалось вывести имитационное ПО.

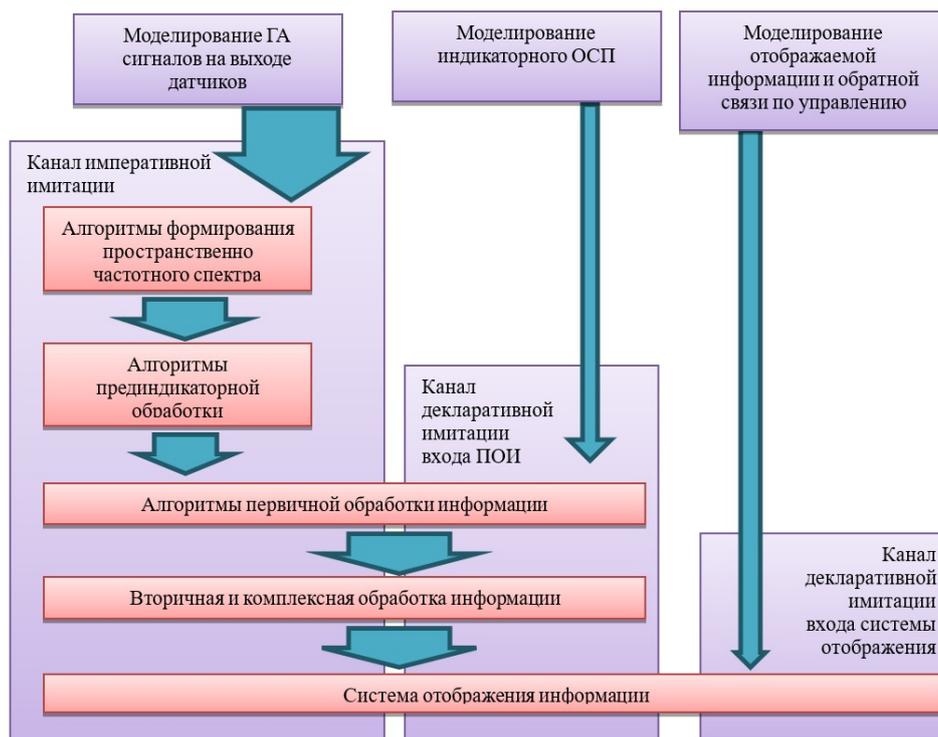


Рис. 1. Организация многоуровневой имитации.

**Общая организация стенда.** Собственно стенд строится по многоуровневой схеме (рис. 1), построение которой подразумевает формирование входных данных на нескольких уровнях обработки сигналов, а именно [3, 4]:

- формирование пространственно-частотного спектра;
- первичная обработка информации (ПОИ);
- система отображения и управления.

Такой подход позволяет вести разработку штатного ПО разных уровней обработки информации в ГАС одновременно. А стыковку осуществлять поэтапно, переходя к имитаторам более низкого уровня. При этом для имитации выходов каналов антенной решётки был безальтернативно выбран императивный подход [5] к формированию данных, что потребовало реализации расчётной части и системы выдачи данных [4]. Недостатком такого подхода является отсутствие обратной связи при воспроизведении данных эпизода. Однако путём реализации возможности суммирования принятых гидролокационных сигналов с основными данными удалось реализовать обратную связь по излучениям [6]. Недостатками такого подхода являются необходимость хранения большого объёма данных на накопителе и невозможность корректировать параметры движения объектов (включая носитель) в эпизоде.

Использование декларативного подхода, напротив, позволило вносить в режиме реального времени любые изменения в воспроизводимый эпизод, что особенно ценно при отладке системы отображения и управления ГАС. Погрешности же декларативных моделей не оказывали существенного влияния на качество отладки штатного ПО, о чём свидетельствует его хорошая переносимость. То есть при переходе к императивному имитатору отсутствовала необходимость в корректировке как самого ПО, так и его настроечных параметров.

В связи с этим возникает вопрос о возможности реализации функционирования имитатора выходов приёмных каналов антенной решётки (АР) в режиме реального времени. Работа имитатора выходов приёмных каналов антенной решётки построена по следующей схеме (рис. 2): для проведения расчётов используется несколько вычислительных машин (ВМ), объединённых в сеть с управляющей ВМ. В свою очередь на каждом из ВМ задача расчёта разделяется для антенн по группам датчиков, каждая из которых обчисляется отдельным потоком процессора. В свою очередь камерально рассчитанные файлы воспроизводятся специальной программой с соблюдением временной диаграммы.

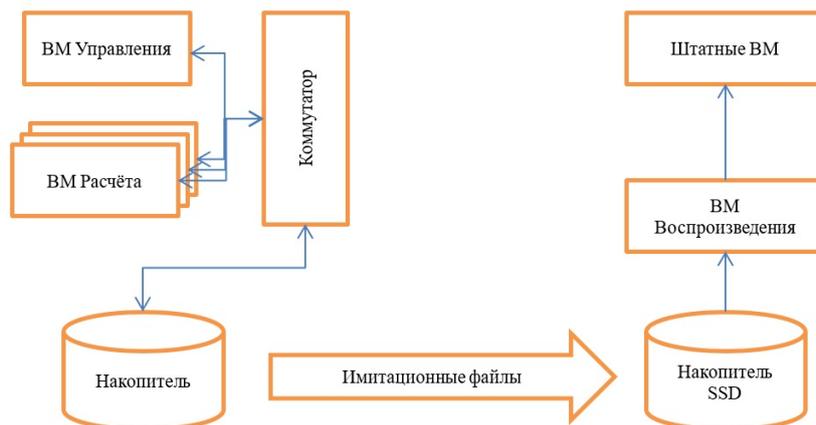


Рис. 2. Организация имитатора выходов приёмных каналов антенной решётки.

В камеральном режиме работы удалось достигнуть точности временной диаграммы  $10^{-5}$  % на серверном VM с процессором Xeon E5-2650 2,2 ГГц (24 потока). Что говорит о достаточности заявленной конфигурации с ОЗУ 32 Гб и Intel C600+ контролера для SSD диска. При этом наблюдаются некоторые ограничения при мультиплицировании и суммировании гидролокационных сигналов с основными данными. Таким образом, при обеспечении сетевой картой с соответствующей производительностью, возможна реализация схемы формирования выходов AP в реальном времени. Общая схема такого построения показана на рис. 3.

На настоящий момент производительность имитационной с учётом вычислительной мощности VM Расчёта части можно определить как:

$$k_{real.rel}(i_{ant}) \approx \frac{W_{base}}{N_{ant}} \sum_{i_{ant}} \frac{N_{nuc}(i_{ant})}{N_{SR}(i_{ant}) f_{disc}(i_{ant})} k_{time}(i_{ant});$$

$$k_{real} = \frac{k_{real.rel}(i_{ant})}{W_{tgt}}$$

где  $i_{ant}$  — индекс AP;  $k_{time}$  — коэффициент отношения имитационного времени к реальному;  $k_{real}$  — коэффициент отношения имитационного времени к реальному на целевой VM (для работы в реальном времени  $k_{real} \ll 1$ );  $N_{ant}$  — количество AP на рассматриваемой VM;  $W_{base}$  и  $W_{tgt}$  — соответственно производительность рассматриваемой («эталонной») и целевой VM во ЕВП (где ЕВП — единиц вычислительной производительности по тесту PassMark CPU Mark);  $N_{nuc}(i_{ant})$  — число вычислительных потоков «эталонной» VM вычисляющих данные для  $i_{ant}$ -й AP,  $N_{SR}(i_{ant})$  и  $f_{disc}(i_{ant})$  — соответственно число датчиков и частота дискретизации  $i_{ant}$ -й AP. Таким образом  $k_{real.rel}$  имеет размерность  $\left[ \frac{\text{ЕВП}}{\text{Гц}} \right]$ .

Для рассматриваемого имитационного ПО диапазон значений  $k_{real.rel}$  для различных эпизодов и параметров имитации приведён в табл. 2.

Таблица 2

Значения  $k_{real.rel}$  для различных конфигураций имитационного ПО и эпизодов

| Режим | Объектов в эпизоде 0 | Объектов в эпизоде 11 |
|-------|----------------------|-----------------------|
| А     | 0,0022               | 0,0114                |
| В     | 0,0022               | 0,0131                |
| ВВ    | 0,0022               | 0,046                 |

Примечание — Параметры режимов:

- режим А: плоский волновой фронт, расчёт 1 водного луча по упрощённому затуханию, некоррелированная по датчикам ветровая помеха;
- режим В: сферический волновой фронт, лучевые гидроакустические расчёты по 1 лучу, некоррелированная по датчикам ветровая помеха;
- режим ВВ: сферический волновой фронт, лучевые гидроакустические расчёты по 5 лучам, некоррелированная по датчикам ветровая помеха.

**Закключение.** На основе опыта разработки в докладе изложены организационные аспекты формирования имитационной части стенда разработки. Приведены временные характеристики и требования к императивной части имитационного ПО, которые позволяют оценить возможность построения стенда на основе имитации выходов антенных решёток в реальном времени.

*Литература*

1. Беляева В. В., Грановский В. А., Прокопович В. В., Шафранюк А. В., Способы оценки уровня адекватности имитационного программно-алгоритмического обеспечения // Мат. 7 Междун. науч.-техн. конф. «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2018)». 2018. С. 180–186.
2. Шафранюк А. В. Опыт отработки гидроакустического комплекса на стенде сопровождения изделия // Тр. XV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2020. С. 511–514.
3. Прокопович В. В., Шафранюк А. В. Подход к оценке адекватности имитационного программно-алгоритмического обеспечения // Тр. конф. ИММОД-2021. СПб. 2021. С. 357–362.
4. Шафранюк А. В., Прокопович В. В. Построение стенда моделирования гидроакустических систем // Тр. конф. ИММОД-2021. СПб. 2021. С. 511–519.
5. Бродский Ю. И. Декларативная и императивная парадигмы программирования в описании поведения сложных распределенных имитационных моделей // Тр. Междун. суперкомпьютерной конференции. М: МГУ, 2012. С.82–87.
6. Шафранюк А. В. Опыт отработки гидроакустического комплекса на стенде сопровождения изделия // Тр. XV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2020. С. 511–514.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

А. В. Шафранюк, канд. техн. наук, Д. А. Добриков

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## SIMULATION MODEL OF THE ICE ENVIRONMENT SURVEILLANCE SYSTEM

A. V. Shafranyuk, Ph.D., D. A. Dobrikov

JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

*Рассматривается построение декларативной модели системы освещения ледовой обстановки с использованием гидролокации. Приводятся ключевые моменты алгоритма, позволяющего формировать выход первичной обработки информации для стендовой отладки последующих уровней обработки в системе.*

*The construction of a declarative model of an ice environment surveillance system using echo ranging is considered. The key points of the algorithm, which allow forming the output of the primary processing of information for bench debugging of the subsequent levels of processing in the system, are given.*

**Введение.** Рассматриваемая задача имитационного моделирования актуальна при формировании программного обеспечения стендов разработки и сопровождения гидроакустических систем и комплексов, обеспечивающих решение задач профилирования ледового покрова. Использование такого программного обеспечения позволит отлаживать штатное программное обеспечение (ПО) без использования натуральных данных, что удешевляет и ускоряет процесс отладки. Позволяет выводить штатное ПО на морскую отработку в большей степени готовности. Существующие на текущий момент имитационные программы позволяют вырабатывать входные данные для различных уровней обработки информации в гидроакустических станциях [1, 2]. Однако в настоящее время вопросы освещения ледовой обстановки в отечественной и иностранной литературе не рассмотрены в достаточном объёме и найти описание имитационных моделей первичной обработки не удалось. В докладе рассматривается обеспечение входными данными системы отображения в канале освещения ледовой обстановки. Такая система так же может служить для генерации входных данных вторичной обработки такого режима при её наличии.

**Постановка задачи.** Использование разрабатываемой модели предполагается в режиме реального времени, для обеспечения обратной связи по параметрам движения носителя с возможностью их изменения оператором модели. Для таких условий наиболее подходящим является декларативный подход к моделированию, когда рассматривается поведение системы в целом, без точной имитации происходящих в ней процессов [3, 4]. Кроме того, такой подход позволяет избежать сложностей императивного подхода [4], при котором потребуется формирование распределённого сигнала реверберационной помехи и использования штатного ПО, которое может отсутствовать в отлаженном виде.

В целом в задаче требуется, используя начальные географические координаты  $(\varphi, \lambda)$  и скорость и курс носителя гидроакустической системы освещения ледовой обстановки (ГАСОЛО)  $v$  и  $\gamma$ , необходимо генерировать гидролокационные сигналы, отражённые от верхней и нижней границы льда в сформированных пространственных каналах (ПК)  $s(i_{TS}) = s_{up}(i_{TS}) + s_{low}(i_{TS})$ , где  $i_{TS}$  —  $i$ -й временной отсчёт;  $s_{up}$ ,  $s_{low}$  — гидролокационные сигналы отражённые соответственно от верхней и нижней поверхности ледового покрова. При этом важным требованием является необходимость обеспечить повторяемость ледового рельефа при возвращении носителя в исходную точку. Рассмотрим в целом модель формирования ледовой поверхности и модель формирования сигналов в ПК. При этом модель льда определяется высотой верхней и нижней поверхности льда относительно уровня моря.

Для описание ледового покрова будем использовать следующие параметры  $\Pi_{ice} = \{R_{corr}, \sigma_{width}, h_{width}\}$ :

- $R_{corr}$  — гладкость ледовой поверхности, описываемая радиусом корреляции;
- $\sigma_{width}$  — перепады ледовой поверхности, определяемые среднеквадратическим отклонением (СКО) толщины льда от средней величины;
- $h_{width}$  — средняя толщина льда, определяемая математическим ожиданием.

**Генерация ледовой поверхности.** При генерации ледовой поверхности будем работать в относительных по отношению к начальному местоположению носителя координатах. При этом  $(\varphi, \lambda)$  используются для получения из баз данных параметров ледового покрова  $\Pi_{ice}$ , если они не заданы явно. Так как существует требование повторяемости ледового рельефа, то модель при генерации использует выборки псевдослучайных чисел с начальным зерном генерации, взаимнооднозначно зависящим от географических координат  $k_{seed} = 10^3 f(\varphi(i_{lat}), \lambda(i_{lon}))$ . Такая модель формирует набор значений узловых точек с достаточно крупным шагом, порядка сотен метров исходя из соображений:

$$\Delta_{geo} < d_{HAS},$$

где  $d_{HAS}$  — максимальная дальность действия ГАСОЛО в горизонтальной плоскости с учётом максимальной глубины носителя, вертикального наклона ПК и максимальной шкалы дальности.

Более мелкая сетка с шагом  $\Delta \ll R_{crr}$  формируется в фиксированной последовательности в виде квадратной области для каждой узловой точки с Севера на Юг и с Запада на Восток. В результате чего формируется плотный набор узловых точек с значениями высоты льда относительно уровня моря для верхней  $h_{up}(i_{node})$  и нижней  $h_{low}(i_{node})$  поверхности, где  $i_{node}$  — индекс узла сетки (рис. 1, а):

$$\begin{aligned} h &= h_{width} + \sigma_{width}N; \\ h_{low} &= -\frac{\rho_{ice}}{\rho_{water}}h; \\ h_{up} &= h + h_{low}, \end{aligned}$$

где  $N$  — реализация случайного числа по стандартному гауссовому распределению;  $h$  — фактическая толщина льда в узловой точке;  $\rho_{ice}$  — плотность льда;  $\rho_{water}$  — плотность воды. Для работы алгоритма формируется девять областей с узловыми точками, что обеспечивает выдачу данных модели при движении носителя в пределах одной области (рис. 1, б), где зелёным цветом помечены области действия модели. При движении носителя происходит пересчёт и замещение областей по схеме, показанной на рис. 2 (красным цветом показаны пересчитанные области).

Для генерации высоты верхней и нижней поверхности льда над уровнем моря будем использовать следующее выражение ( $h_{low}$  вычисляется аналогично):

$$h_{high} = \frac{1}{\sum_{i_{node}} \omega(i_{node})} \sum_{i_{node}} \omega(i_{node}) h_{node.high}(i_{node}),$$

где  $\omega(i_{node}) = R_{crr} - R(i_{node})$ , где  $R(i_{node})$  — расстояние от  $i_{node}$ -й узловой точки до точки, для которой вычисляются параметры ледового покрова.

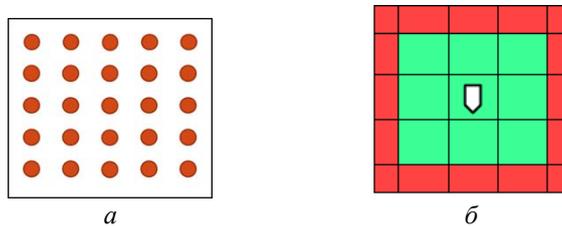


Рис. 1. Задание сетки узловых точек и областей.

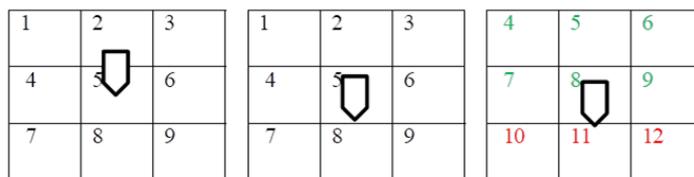


Рис. 2. Схема пересчёта и замещения областей.

**Генерация выходного сигнала в ПК.** Рассмотрим основные режимы работы, которые могут присутствовать в системах типа ГАСОЛО:

– обзор ледовой поверхности строго вверх для построения карты профиля льда над носителем ГАСОЛО (рис. 3, а). В этом случае возможно пренебречь отклонением от вертикали угла ПК и параметры ледового покрова рассчитывать в точке пересечения ПК с поверхностью моря (красная точка на рис. 4). Алгоритм для имитационного моделирования такой ситуации далее не рассматривается в виду его тривиальности;

– упреждение столкновения с айсбергами (рис. 3, б). В этом случае расстояния по ПК до пересечения с нижней и верхней поверхностью льда будут существенно отличаться от точки пересечения ПК с поверхностью (жёлтые точки на рис. 4). В этом случае потребуется дополнительный алгоритм трассировки вдоль ПК, который рассмотрим ниже, тем более что он работоспособен и для вышеописанного случая, являясь более общим.

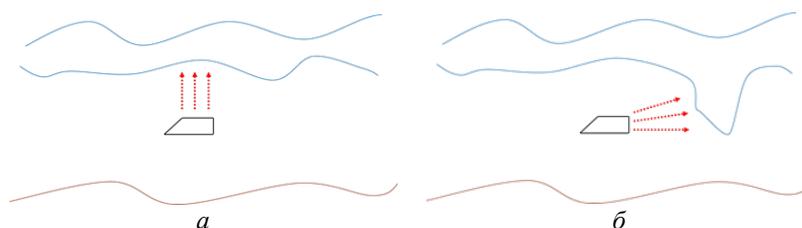


Рис. 3. Режимы работы систем типа ГАСОЛО.

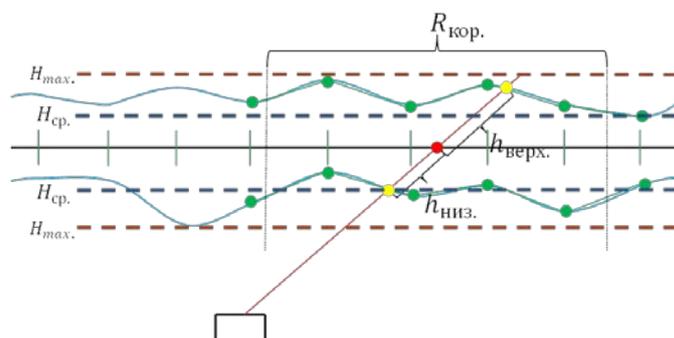


Рис. 4. Схема точек пересечения ПК с поверхностями моря и льда.

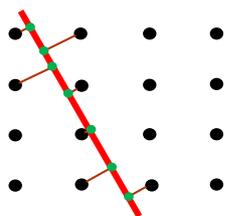


Рис. 5. Поиск экстремумов ледовой поверхности на горизонтальной проекции прямой направления ПК.

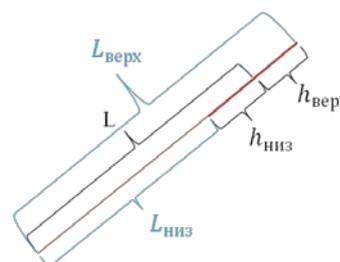


Рис. 6. Расстояния до точки пересечения с ледовыми поверхностями.

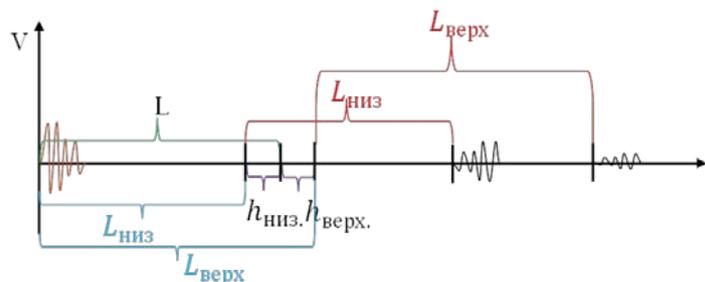


Рис. 7. Формирования выходного сигнала ПК ГАСОЛО.

В связи с существенным расхождением точек пересечения по горизонтали для канала «вперёд» возникает необходимость поиска точек пересечения. Для этого предполагается следующий алгоритм: на горизонтальной проекции направления ПК производится примерный расчёт точек экстремума как ближайших в узловым точкам (рис. 5), находящимся на удалении от прямой меньшим радиуса корреляции  $R_{crr}$ . Далее по вычисленным параметрам льда ( $h_{low}$  и  $h_{up}$ ) производится линейная интерполяция и последующим поиском пересечений.

Из рис. 4 определим соответствующие расстояния от точки излучения до ледовой поверхности (рис. 6).

Формирование выхода ПК для гидролокационного сигнала заданной формы производится в соответствии с рис. 7. Окончательно сигнал суммируется с шумом  $-6$  дБ/окт с приведённой мощностью, соответствующей шумам моря.

**Заключение.** В работе предложен алгоритм функционирования имитационной модели первичной обработки данных в ГАСОЛО, позволяющий в условиях стенда проводить отладку отображения и вторичной обработки информации в системе освещения ледовой обстановки. Причём предложенный алгоритм может работать как в условиях направленности ПК ГАСОЛО вверх, так и вперёд, что позволяет существенно расширить перечень пригодных к отладке систем, включая и системы обнаружения айсбергов.

#### *Литература*

1. Шафранюк А. В. Имитационно-моделирующий комплекс для обеспечения жизненного цикла систем освещения подводной и надводной обстановки // Тр. Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2016. № 13. С. 314–316.
2. Шафранюк А. В., Прокопович В. В. Построение стенда моделирования гидроакустических систем // Тр. 10 Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). (электронное издание) / Под ред. А. М. Плотников, М. А. Долматов, Е. П. Смирнова. СПб. 2021. С 511–519.
3. Павлов А. И. Разработка системы поддержки проектирования имитационных моделей сложных систем на основе декларативного метода описания агентов // Тр. конф. ИММОД–2015 / Под ред. А. И. Павлов, А. Б. Столбов. СПб. 2015.
4. Бродский Ю. И. Декларативная и императивная парадигмы программирования в описании поведения сложных распределенных имитационных моделей // Тр. Междун. суперкомпьютерной конференции. М.: Изд-во «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова», 2012. С. 82–87.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

## ДИНАМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ РАСПИСАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ СИГНАЛОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПОИСКА ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННОЙ АКВАТОРИИ

А. А. Стребкова, Ю. Е. Терехов, канд. физ.-мат. наук  
АО «Корпорация «Комета», Москва, Россия

## DYNAMIC SCHEDULING OF SONAR SIGNALS IN A MULTISTATIC UNDERWATER MONITORING SYSTEM FOR THE PROBLEM OF UNDERWATER OBJECTS SEARCH IN A CONFINED WATER AREA

A. A. Strebkova, Yu. E. Terekhov, Ph.D.  
JSC «Corporation «Kometa», Moscow, Russia

*Рассмотрена задача поиска подводных объектов в ограниченной акватории. Поиск объектов ведётся гидроакустическими станциями (ГАС) в режиме активной гидролокации из состава многопозиционной системы подводного наблюдения (МСПН). ГАС управляются из единого центра. Приведён способ выбора следующей излучающей ГАС, не приводящий к созданию помех приёму ранее излучённых сигналов при малом периоде излучений. Рассмотрено влияние выбора функции вознаграждения и интервала между последовательными излучениями на суммарное время, необходимое для осмотра заданной акватории.*

*The problem of underwater objects search in a confined water area is considered. Sonar sensor nodes forming a multistatic underwater monitoring system with central control conduct the search. A method for selecting next emitting sensor node respecting previously emitted sonar signals is given. Small emission interval between successive signals is assumed. Dependence of total time required for a search in a confined water area from a reward function and emission interval is considered.*

Многопозиционные системы подводного наблюдения (МСПН) состоят из множества взаимодействующих между собой стационарных гидроакустических станций, корабельных, лодочных или вертолётных гидроакустических комплексов, распределённых по акватории. Обычно МСПН решают задачи обнаружения объектов в акватории [1–5] и связи с объектами [6–8]. Для этого входящие в состав МСПН средства (далее — ГАС) имеют аппаратуру, принимающую и излучающую гидроакустические сигналы.

В настоящей работе рассматривается задача формирования динамического расписания излучений МСПН минимизирующего время освещения объектовой обстановки в акватории. При этом для исключения случаев создания ГАС помех друг другу учитывается скорость распространения сигналов. По площади акватории размещены ГАС, способные излучать заданный набор зондирующих сигналов. Каждый сигнал характеризуется дальностью, с которой излучающая его ГАС может обнаружить объекты с заданной вероятностью, и дальностью, при которой сигнал создаст помехи на других ГАС. Интервал между последовательными излучениями фиксированный. Станции работают в режиме моностатической гидролокации. Для этого разобьём область моделирования, в которой находится контролируемая акватории, на регулярную прямоугольную сетку из ячеек. Пусть  $I$  ячеек — размер сетки вдоль оси  $x$ , а  $J$  ячеек — вдоль оси  $y$ . При этом контролируемая акватория имеет размер  $I_a$  ( $i_1 \dots i_{end}$ ) на  $J_a$  ( $j_1 \dots j_{end}$ ) ячеек. Каждой ячейке поставим в соответствие вероятность  $p_{t,i,j}$  присутствия в ней объекта в момент времени  $t$  [9]. Вероятность  $p_{t,i,j}$  может принимать любое значение в интервале  $[0; 1]$ . При этом  $p_{t,i,j} = 0$  означает, что в этой ячейке точно отсутствуют объект. Вероятность  $p_{t,i,j} = 1$  означает, что в этой ячейке точно присутствует объект. Вероятность  $p_{t,i,j} = 0,5$  означает, что нет информации об отсутствии или присутствии объекта в ячейке. Тогда для всей акватории введём параметр мониторинга  $P_t$ , определяемый в каждый момент времени, как среднее значение вероятности присутствия объектов в ячейках, лежащих внутри акватории

$$P_t = \frac{1}{I_a \cdot J_a} \sum_{i=i_1}^{I_a} \sum_{j=j_1}^{J_a} p_{t,i,j}. \quad (1)$$

Вероятность  $p_{t,i,j}$  в ячейке изменяется при излучении зондирующего сигнала ГАС. При каждом излучении для ячейки, находящейся в пределах зоны обнаружения сигнала,  $p_{t,i,j} \rightarrow 0$ , если в ячейке действительно отсутствует объект или  $p_{t,i,j} \rightarrow 1$ , если объект там действительно присутствует или произошло событие ложного обнаружения.

Задачей алгоритма динамического формирования расписания является минимизация параметра мониторинга  $P_t$  за минимальное время. При этом, если в акватории отсутствуют объекты, то параметр мониторинга  $P_t$  будет стремиться к нулю. Если же в акватории присутствует  $n$  объектов, то согласно (1) параметр будет стремиться к величине  $n/I_a J_a$ .

**Расчёт изменения вероятности присутствия объекта при излучении сигнала ГАС.** В случае, когда ячейка попадает в зону действия зондирующего сигнала  $k$  гидроакустической станции  $n$ , возможны два пути изменения вероятности присутствия объекта в ячейке  $p_{t,i,j}$ . В первом случае, когда в ячейке действительно присутствует объект, и он обнаружен, то

$$p_{t,i,j} = \frac{P_d(n,k,r_{n,i,j}) \cdot p_{t,i,j}}{P_d(n,k,r_{n,i,j}) \cdot p_{t,i,j} + P_{fa}(n,k) \cdot (1 - p_{t,i,j})}, \quad (2)$$

где  $p_{t,i,j}$  — вероятность присутствия объекта в ячейке после прихода зондирующего сигнала;  $p_{t,i,j}$  — вероятность присутствия объекта в ячейке до прихода зондирующего сигнала;  $P_d(n,k,r_{n,i,j})$  — вероятность правильного обнаружения объекта для выбранной ГАС и типа сигнала при расстоянии  $r_{n,i,j}$  между ГАС и ячейкой;  $P_{fa}(n,k)$  — вероятность ложной тревоги для выбранной ГАС и типа сигнала.

Во втором случае, когда обнаружение не произошло, вероятность  $p_{t,i,j}$  изменяется [5, 9] по следующему соотношению

$$p_{t,i,j} = \frac{(1 - P_d(n,k,r_{n,i,j})) \cdot p_{t,i,j}}{(1 - P_d(n,k,r_{n,i,j})) \cdot p_{t,i,j} + (1 - P_{fa}(n,k)) \cdot (1 - p_{t,i,j})}. \quad (3)$$

Поскольку гидроакустические сигналы распространяются в морской среде с конечной скоростью, следовательно, вероятность присутствия объектов в ячейках должна пересчитываться, не мгновенно, а в момент, когда отражённый сигнал вернётся на излучившую его станцию. т.е. пройдёт двойное расстояние  $r_{n,i,j}$  между ГАС и ячейкой со скоростью звука  $c$ . Номер шага пересчёта вероятности  $t'$  зависит так же от такта излучения сигнала и величины шага по времени  $\Delta t$ .

$$t' = t + \left\lceil \frac{2 \cdot r_{n,i,j}}{c} \cdot \frac{1}{\Delta t} \right\rceil, \quad (4)$$

где  $\lceil \quad \rceil$  означают округление вверх.

**Правило выбора излучающей ГАС и типа сигнала.** Задача поиска объектов в настоящей работе решается с использованием «жадного» подхода: каждое следующее излучение в МСПН должно максимизировать снижение параметра мониторинга  $P$  в контролируемой акватории. Для этого введём функцию вознаграждения  $R^{n,k}$ , характеризующую вклад каждого варианта сочетаний ГАС и сигнала из возможных. В настоящей работе рассмотрено две функции вознаграждения. Рассматриваются две функции вознаграждения:

- функция вознаграждения  $R_1^{n,k}$  рассчитывается как разница суммарного изменения вероятностей присутствия объектов в ячейках акватории для выбранной ГАС  $n$  и типа сигнала  $k$ ;
- функция вознаграждения  $R_2^{n,k}$  аналогична  $R_1^{n,k}$ , но имеющая весовой коэффициент на эффективную зону действия сигнала  $k$  ГАС  $n$ .

**Учёт ограничений на выбор излучающей ГАС и типа сигнала в связи с взаимными помехами.** При выборе ГАС и типа излучаемого сигнала имеется следующее ограничение: ранее излучённые в пространство сигналы не должны создавать помехи приёму для выбранного в данный момент сигнала и ГАС. Введём для учёта этих ограничений динамически заполняемую матрицу запретов на излучение  $Z$ . Каждая строка матрицы соответствует номеру  $n$  станции в

МСПН. Каждый столбец матрицы соответствует одному такту времени. В начале моделирования все элементы матрицы заполнены нулями.

Матрица запретов излучений заполняется следующим образом:

- для станции  $n$  излучающей сигнал с такта  $t$  — начало излучения, до такта  $t_1$  — окончание приема развертки элементы матрицы  $Z$  в строке  $n$  приравниваются  $n$ ;
- для станций  $q$ , через которые проходит излученный ГАС  $n$  сигнал, с такта  $t_2$  — такт прохождения излученного ГАС  $n$  сигнала через станцию  $q$  до такта  $t_3$  — такт, в котором сигнал  $k$  от ГАС  $n$  достигнет ГАС  $q$  после переотражения от потенциально присутствующих в зоне действия объектов элементы матрицы  $Z$  в строках  $q$  приравниваются —  $n$ .

При таком заполнении матрицы запретов на излучение  $Z$  в момент  $t$  следующего выбора излучающей ГАС и типа сигнала необходимо выполнить проверку, что все значения матрицы  $Z$  для рассматриваемой станции в столбцах с такта  $t$  до  $t_1$  нулевые. В этом случае, ни одно из существующих излучений не создаст помех этой ГАС для приёма собственного сигнала.

Указанные проверки допустимости излучения следует проводить до вычисления функций вознаграждения. При этом может сложиться ситуация, что в данный такт моделирования не существует сочетания ГАС и сигнала, которое не создаст помех работе других ГАС. Соответственно, в этом такте никакие излучения сигналов не производятся.

**Сравнение алгоритма и со случайным выбором излучающей станции.** Работа изложенного выше алгоритма была протестирована со следующими параметрами. Двумерная область моделирования  $x = 240$  км на  $y = 240$  км,  $\Delta x = 3$  км,  $\Delta y = 3$  км. Вероятности присутствия объекта в начальный момент времени 0,5. Контролируемая акватория центрирована относительно области моделирования и имеет размеры 180 км на 180 км. В акватории на расстоянии 10 км от её границ регулярной сеткой расставлена 81 станция. Расстояние между станциями по горизонтали и вертикали равно 20 км. Каждая станция может одновременно излучить один из трёх сигналов. Максимальная дальность обнаружения объектов ГАС при излучении этих сигналов 10, 20 и 30 км. Дальность помехового действия сигнала (величина  $\alpha$ ) принята в два раза большей дальности обнаружения. Вероятность ложного обнаружения принята равной  $10^{-3}$ . Реальные объекты в моделировании отсутствуют.

Зависимости изменения параметра мониторинг в районе  $P_t$  от времени получены моделирования для периодов излучений 3 и 12 с (см. рис. 1 и 2). Для каждого варианта проводилось 10 моделирований, по которым рассчитывались средние значения. На рис. 1, 2 кривые: 1 — выбор ГАС и сигнала по вознаграждению  $R_1$ ; 2 — выбор ГАС и сигнала по весовому вознаграждению  $R_2$ ; 3 — случайный выбор ГАС и сигнала; 4 — случайный выбор ГАС, сигнал с максимальной дальностью обнаружения.

При моделировании данного алгоритма были рассмотрены четыре способа выбора ГАС и сигнала:

- 1) выбор ГАС и сигнала по вознаграждению  $R_1^{n,k}$ ;
- 2) выбор ГАС и сигнала по весовому вознаграждению  $R_2^{n,k}$ ;
- 3) случайный выбор ГАС и сигнала;
- 4) случайный выбор ГАС, сигнал с максимальной зоной обнаружения.

Во всех случаях учитываются ограничения, накладываемые матрицей запретов на излучение. На графике с периодом излучения 3 с можно увидеть, что зависимости от времени для функций вознаграждения и случайного выбора ГАС с сигналом максимальной дальности, уходят в насыщение, не достигая минимума. Это связано с тем, что при малом периоде излучений освещаются уже ранее осмотренные области акватории, что не приводит к значительному изменению параметра мониторинга.

При периоде излучений 12 с минимальное время, затрачиваемое на освещение обстановки в акватории, получено при выборе ГАС и сигнала по вознаграждению  $R_1^{n,k}$  — 441 с (излучено 36 сигналов 3). При этом при выборе ГАС и сигнала по вознаграждению  $R_2^{n,k}$  затрачено 483 с (излучено 39 сигналов 3 и 1 сигнал 2).

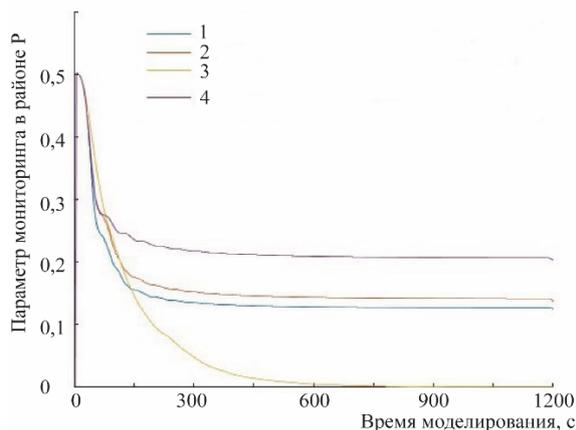


Рис. 1. Зависимость параметра мониторинга в акватории от выбора ГАС и сигнала при периоде излучений 3 с.

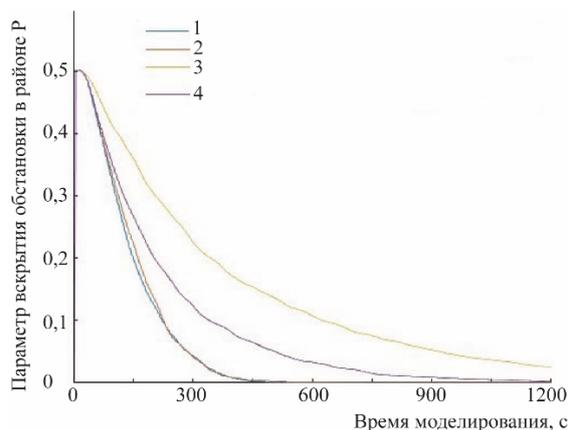


Рис. 2. Зависимость параметра мониторинга в акватории от выбора ГАС и сигнала при периоде излучений 12 с.

**Заключение.** В работе предложен способ описания акватории с помощью числовой характеристики «знания» объектовой обстановки — параметр мониторинга в акватории. Приведен алгоритм формирования расписания излучений при решении задачи поиска подводных объектов МСПН в ограниченной акватории. Алгоритм включает в себя способ выбора следующей излучающей ГАС и её гидроакустического сигнала с использованием функции вознаграждения, не приводящий к созданию помех приёму ранее излучённых сигналов.

Приведены графики зависимости скорости изменения параметра мониторинга в акватории от времени моделирования и периода излучений сигналов при использовании предложенного алгоритма и алгоритмов со случайным выбором ГАС и сигнала и случайным выбором ГАС при использовании сигнала максимальной дальности обнаружения цели ГАС.

#### Литература

1. Ouelhadj D., Petrovic S. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems // J. of Scheduling. 2009. Vol. 12. P. 417–431.
2. Громов С. А., Тарасов В. Б. Интегрированные интеллектуальные системы оперативного планирования производства // Изв. ЮФУ «Технические науки». 2011. Т. 120. Вып. 7. С. 60–67.
3. Saksena A. Wang I-J. Dynamic Ping Optimization for Surveillance in Multistatic Sonar Buoy Networks with Energy Constraints // Proceedings of the 47<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control. Mexico. 2008.
4. Angley D., Ristic B., Suvorova S., Moran B., Fletcher F., Gaetjens H., Simakov S. Non-myopic sensor scheduling for multistatic sonobuoy fields // IET Radar Sonar and Navigation. 2017. Vol. 11. Iss. 12. P. 1770–1775. 2017.
5. Gilliam C., Angley D., Suvorova S., Ristic B., Moran B., Fletcher F., Gaetjens H., Simakov S. Scheduling of Multistatic Sonobuoy Fields using Multi-Objective Optimization. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Canada. 2018.
6. Chitre M., Motani M., Shahabudeen S. A scheduling algorithm for wireless networks with large propagation delays // Oceans 2020 IEEE. Sydney. 2010.
7. Anjangi P., Chitre M. Scheduling Algorithm with Transmission Power Control for Random Underwater Acoustic Networks // Oceans 2015 IEEE. Genova. 2015.
8. Zhang Y., Chen Y., Zhou S., Xu X., Shen X., Wang H. Dynamic Node Cooperation in An Underwater Data Collection Network // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16, № 11. P. 4127–4136.
9. Krout D. W., Fox W. L. J., El-Sharkawi M. A. Probability of Target Presence for Multistatic Sonar Ping Sequencing // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2009. Vol. 34, № 4. P. 603–609.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ В ПЕЛЕНГАТОРАХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ

А. А. Павлов

АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES ON THE APPLICATION OF COMPLEX SIGNALS IN DIRECTION FINDERS OF AUTONOMOUS UNDERWATER ENVIRONMENT SURVEILLANCE SYSTEMS

A. A. Pavlov

JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

*В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований по применению сложных фазоманипулированных сигналов в пеленгаторах автономных систем освещения подводной обстановки. Целью исследований была оценка точности определения угловых координат реальных объектов разрабатываемым пеленгатором.*

*The article discusses the results of experimental studies on the use of complex phase-shift keyed signals in direction finders of autonomous underwater environment surveillance systems. The purpose of the research was to evaluate the accuracy of determining the angular coordinates of real objects by the developed direction finder.*

**Введение.** Автономные системы подводного наблюдения необходимы для решения широкого круга задач, связанных с морской деятельностью. Основное предназначение таких систем — обнаружение морских объектов и определение их местоположения в пространстве. Для повышения точности определяемых параметров в качестве зондирующей посылки целесообразно использовать сложные, шумоподобные (ШП) сигналы [1]. Корреляционные свойства подобных сигналов позволяют реализовать алгоритм пеленгования объектов. В отличие от фазового метода пеленгования тональных сигналов применение ШП сигналов позволяет определять угловые координаты по одной реализации при сниженной пиковой мощности излучения.

**Алгоритм пеленгования.** При определении угловых координат объекта вычисляется функция взаимной корреляции входных процессов, приходящих на разнесённые приёмные устройства. Работу алгоритма пеленгования можно пояснить, представив его в аналоговой форме и предварительно сделав следующие допущения:

- время прихода сигнала известно и равно нулю;
- расстояние до источника пеленгуемого сигнала велико по сравнению с расстоянием между приёмниками базы, что позволяет рассматривать приходящий сигнал как плосковолновой;
- сигнал и помеха обладают эргодическими и гауссовскими свойствами и являются некоррелированными.

Рассмотрим прохождение суммы сигнала  $s$  и шума  $n$  через приёмный корреляционный тракт, на входы которого воздействуют сигналы, пришедшие на приёмные устройства 1 и 2, разнесённые на расстояние  $d$  (рис. 1).

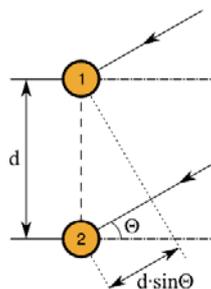


Рис. 1. Плосковолновой сигнал, воздействующий на приёмную базу пеленгатора.

Если направление прихода сигнала к приёмникам составляет с нормалью к базе угол  $\theta$ , то для процессов на выходах приёмников базы можно записать:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= s(t) + n_1(t); \\ u_2(t) &= s(t + \tau) + n_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau = \frac{d \cdot \sin \theta}{c}$  — задержка между плоскороволновыми сигналами, воздействующими на вход приёмных устройств;  $c$  — скорость звука. Вводя искусственную задержку  $\tau_0$ , соответствующую углу компенсации базы в направлении прихода пеленгуемого сигнала, перепишем выражение для  $u_2(t)$  в виде:

$$u_2(t) = s(t - (\tau_0 - \tau)) + n_2(t - \tau_0). \quad (2)$$

Вычисляя среднее статистическое произведение процессов  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  на выходе корреляционного тракта и в силу принятых выше допущений относительно статистической независимости сигналов и помех, а также помех, действующих на приёмники базы, получим:

$$z(t) = a \int_0^{T_s} u_1(t) u_2(t) dt = a \int_0^{T_s} s(t) s(t - (\tau_0 - \tau)) dt. \quad (3)$$

Выражение (3) представляет функцию автокорреляции пеленгуемого сигнала, которая достигает максимального значения в момент отсутствия сдвига между сигналами, то есть в момент, когда  $(\tau_0 - \tau) = 0$ .

Таким образом, алгоритм пеленгования источника сигнала состоит из двух этапов:

- вычисление корреляционного интеграла между сигналами, поступающими на приёмные элементы и сравнение его значения с порогом;
- вычисление значения компенсирующей задержки  $\tau_0$  в момент превышения порогового уровня.

После вычисления значения компенсирующей задержки, угол направления на объект  $\theta$  вычисляется в соответствии с выражением:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\tau_0 \cdot c}{d}\right). \quad (4)$$

Величина компенсирующей задержки отсчитывается в момент превышения функцией взаимной корреляции порогового значения в соответствии с выражением:

$$\tau_0 = i_n * \Delta t, \quad (5)$$

где  $i_n$  — номер дискретного отсчёта функции взаимной корреляции, на котором был превышен порог;  $\Delta t = \frac{1}{f_d}$  — интервал дискретизации аппаратуры;  $f_d$  — частота дискретизации.

Аппаратурная ошибка вычисления величины  $\tau_0$  определяется интервалом дискретизации. На практике точность оценки пеленгования источника в вертикальной плоскости очень сильно зависит от фактических гидроакустических условий, особенно в условиях вертикальной рефракции, обусловленной наличием вертикального градиента скорости звука.

**Описание макета пеленгатора.** С целью экспериментальной оценки аппаратурной точности определения угловых координат объекта был разработан и изготовлен макет пеленгатора. Приёмно-излучающее устройство макета представляет собой дискретную антенную решётку из 22 стержневых керамических преобразователей с прямоугольной рабочей накладкой, разнесённых на половину длины волны. Преобразователи попарно объединены в 11 линеек (рис. 2).

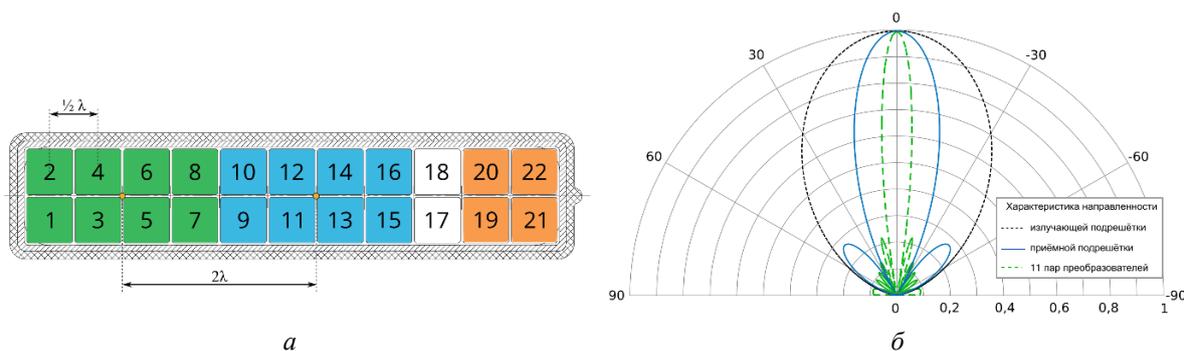


Рис. 2. Распределение преобразователей антенны в приёмных и излучающей решётках (а); характеристики направленности приёмной и излучающей антенн (б).

Путём объединения 11 линеек преобразователей возможно сформировать характеристику направленности с раствором по уровню 0,7 порядка  $10^\circ$ . Создание веера подобных характеристик позволяет в теории обеспечить точность определения угловых координат в  $5^\circ$ .

Для макета пеленгатора антенная решётка была сконфигурирована следующим образом. В режиме приёма антенная решётка разбита на две подрешётки по четыре пары элементов в каждой (элементы 1–8, 9–16). Фазовые центры приёмных подрешёток разнесены на две длины волны. Раствор лепестка характеристики направленности в вертикальной плоскости по уровню 0,7 составляет  $\approx 60^\circ$ , в горизонтальной плоскости  $\approx 26^\circ$ .

В режиме излучения, путём объединения преобразователей 19–22, формируется характеристика направленности с раствором по уровню 0,7 в горизонтальной и вертикальной плоскости  $\approx 60^\circ$ . В качестве зондирующего импульса использовался сигнал с внутримпульсной фазовой манипуляцией (ФМ) по закону последовательности максимальной длины (М — последовательности).

**Описание эксперимента.** Эксперимент по оценке точности определения угловых координат проводился на натуральных испытаниях в акватории Ладожского озера. Схема эксперимента изображена на рис. 3, а.

Макет пеленгатора размещался в батикамере. Глубина места постановки составляла  $\sim 45$  м. Обеспечивающее судно фиксировалось на двух якорях. Батикамера на жёстко закреплённых штангах опускалась на глубину  $\sim 12$  м. На палубе штанги крепились к специальному столу с поворотным устройством (рис. 3, б). В качестве объекта пеленгования использовалось опытовое судно ОС-57 с осадкой порядка 2,5 м, которое фиксировалось на якорю на удалении более 800 м. от обеспечивающего судна.

В ходе эксперимента, с помощью поворотного устройства, батикамера направлялась на объект. Точность направления контролировалась на борту с помощью предварительной обработки полученных эхосигналов. Затем батикамера поворачивалась на углы  $\pm 10^\circ$ . В каждом положении производилось порядка 150 циклов излучения-приёма и записи эхосигналов.

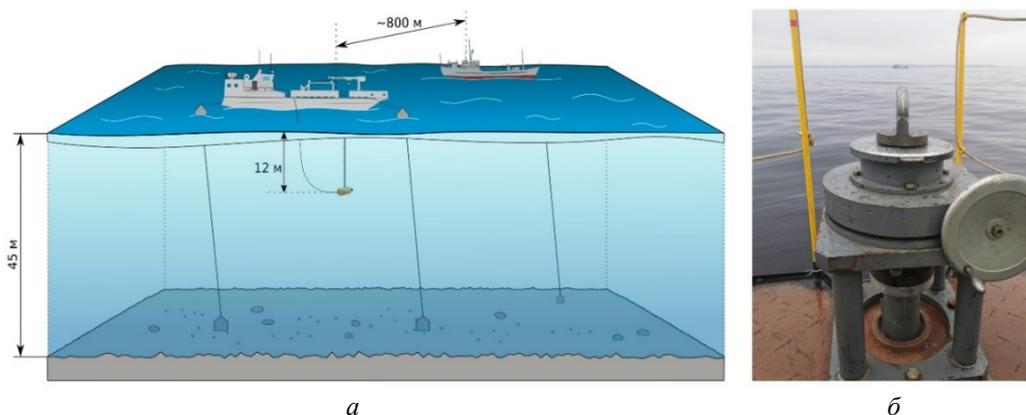


Рис. 3. Схема натурального эксперимента (а) и поворотное устройство (б).

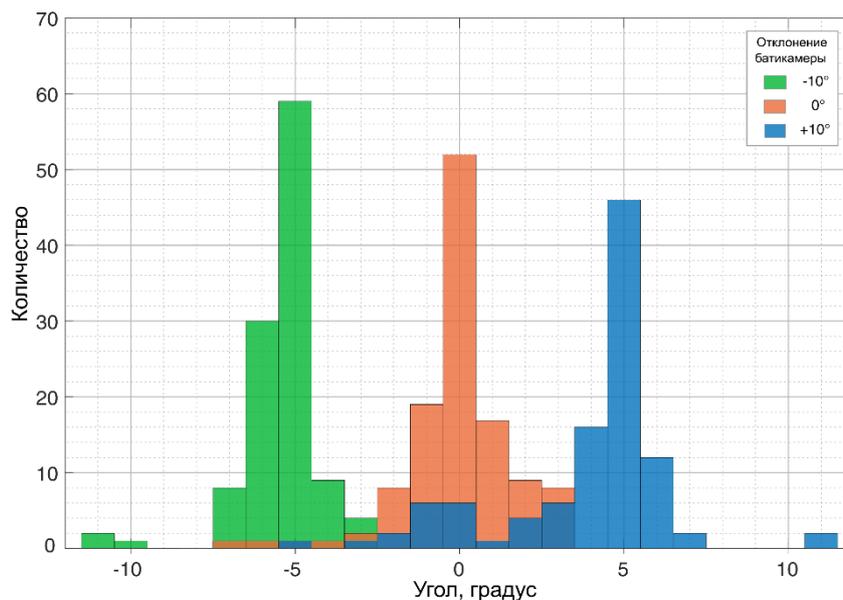


Рис. 4. Гистограммы распределения значения вычисленного угла при различных отклонениях батикамеры.

**Результаты эксперимента.** При обработке данных вычислялась функция взаимной корреляции сигналов, пришедших на приёмные подрешётки, и фиксировалось значение отсчёта, на котором был превышен порог. Номер отсчёта соответствует величине компенсирующей задержки, по которой определяется (4) угол направления на объект. По результатам обработки строились гистограммы распределения вычисленных значений, которые приведены на рис. 4. Согласно полученным результатам, точность определения угловых координат морского объекта в реальных условиях с высокой долей вероятности можно оценить в  $2^\circ$ .

**Заключение.** В ходе экспериментальных исследований по применению сложных фазоманипулированных сигналов в пеленгаторах автономных систем освещения подводной обстановки удалось оценить точность определения угловых координат реальных морских объектов. Использование пеленгационного алгоритма позволяет повысить точность по сравнению с классическим подходом с формированием веера характеристик направленности. Возможность увеличения точности аппаратурной оценки угловых координат объектов путём повышения частоты дискретизации, будет рассмотрена при дальнейших экспериментах.

#### *Литература*

1. Калминский Б. Г., Павлов А. А. К вопросу применения шумоподобных сигналов в активных гидролокаторах автономных систем освещения подводной обстановки // Тр. XV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2020. С. 580–583.

## ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ БОРТОВЫХ АНТЕНН ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

А. И. Машошин, д-р техн. наук

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## VALIDATION OF CHARACTERISTICS OF ONBOARD WIDE-APERTURE ANTENNAS OF FUTURE-TECHNOLOGY SUBMARINES

A. I. Mashoshin, Dr.Sc.

JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

*В работе показано, что основным назначением бортовых антенн перспективных ПЛ является обеспечение боевой устойчивости ПЛ путём: 1) своевременного обнаружения и определения координат малошумных ПЛ и АНПА противника; 2) обнаружения торпед в кормовом секторе курсовых углов и противолодочных вертолётов и самолётов во всей верхней полусфере. Первая задача решается установкой широкоапертурных бортовых антенн, конфигурация, размеры и конструкция которых выбираются с учётом приведённых в статье ограничений. Для решения второй задачи побортно устанавливаются линейные протяжённые бортовые антенны, имеющие ряд преимуществ перед гибкими протяжёнными буксируемыми антеннами.*

*The paper shows that the main purpose of the onboard antennas of future-technology submarines is to ensure the combat stability of the submarines by: 1) timely detection and determination of the coordinates of low-noise submarines and AUVs; 2) detection of torpedoes in the aft sector of heading angles and antisubmarine helicopters and aircraft in the entire upper hemisphere. The first task is solved by installing onboard wide-aperture antennas, the configuration, size and design of which are selected taking into account the limitations given in the article. To solve the second problem, linear extended onboard antennas are installed side-by-side, which have a number of advantages over flexible extended towed antennas.*

**Введение.** Абсолютное большинство подводных лодок (ПЛ) ВМС зарубежных стран последних двадцати лет постройки оснащены бортовыми антеннами (БА) [1].

Целью статьи является рассмотрение места БА в гидроакустическом вооружении перспективных ПЛ и их характеристики.

**Место бортовых антенн в гидроакустическом вооружении перспективных подводных лодок.** Традиционно на гидроакустическое вооружение ПЛ, объединенное в гидроакустические комплексы (ГАК), возлагалось решение двух основных задач:

- поиск подводных лодок и соединений надводных кораблей противника в назначенном районе;
- обеспечение боевой устойчивости ПЛ путем своевременного обнаружения противолодочных сил противника и используемого ими оружия.

Однако ввиду существенного снижения шумности современных ПЛ их поиск с использованием ГАК ПЛ перестал быть эффективным. Задача поиска малошумных ПЛ (а теперь уже и автономных необитаемых подводных аппаратов — АНПА) противника постепенно передаётся распределённым системам подводного наблюдения, объединяющим на сетевой основе автономные активно-пассивные гидроакустические станции [2] либо АНПА [3].

Задача поиска соединений надводных кораблей более эффективно решается средствами космической и авиационной разведки.

Ввиду этого акцент в назначении ГАК ПЛ смещается в сторону обеспечения боевой устойчивости ПЛ. При этом основным режимом ГАК ПЛ остаётся режим шумопеленгования (ШП), не нарушающий скрытность своей ПЛ.

С этой точки зрения оснащение ПЛ бортовыми антеннами преследует следующие цели:

- 1) повышение дальности обнаружения малошумных ПЛ и АНПА;
- 2) высокоточное определение дистанции до обнаруженных целей;
- 3) обнаружение торпед в кормовом секторе курсовых углов, а также противолодочных вертолётов и самолётов во всей верхней полусфере.

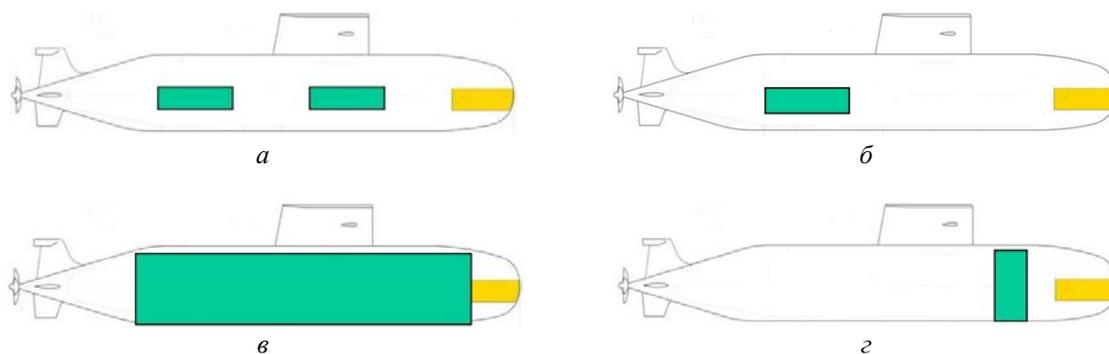


Рис. 1. Варианты конфигурации бортовых антенн.

**Бортовые антенны, обеспечивающие повышение дальности обнаружения и определение дистанции малозумных ПЛ и АНПА.** Главным условием обеспечения боевой устойчивости ПЛ является паритет (и желательно преимущество) в дальности обнаружения ПЛ противника в режиме ШП. Основными путями достижения паритета, кроме снижения шумности ПЛ, является увеличение площади антенн ШП путём оснащения ПЛ широкоапертурными бортовыми антеннами (рис. 1).

При выборе конфигурации широкоапертурных БА необходимо учитывать следующие факторы:

- БА должны иметь хорошее разрешение в горизонтальной плоскости, т.е. иметь достаточно большую ширину для обеспечения эффективной работы в условиях интенсивного надводного судоходства (рис. 1, а, б). Располагаться они должны ниже уровня максимальной полушироты ПЛ (чтобы не повреждать антенну при швартовке), но как можно ближе к нему, чтобы не терять свою помехоустойчивость вследствие отклонения от вертикального положения;

- учитывая, что антенны ШП имеют весьма высокую стоимость, пропорциональную своей площади, рассмотрению не подлежит вариант БА, накрывающий большую часть борта ПЛ (рис. 1в) (его стоимость будет составлять существенную долю стоимости всей ПЛ);

- развивать БА по вертикали (рис. 1, г) смысла нет, поскольку вертикально развитые антенны (с высотой более 20 длин волн на верхней частоте рабочего диапазона частот) эффективны для обнаружения ПЛ и пассивного определения дистанции до них только в условиях, в которых возможно раздельное пеленгование акустических лучей, что имеет место в дальних зонах акустической освещенности (ДЗАО) [4]. Однако расчеты показывают [5], что даже с вертикально развитыми антеннами обнаружение современных иностранных ПЛ в ДЗАО возможно только в редких случаях (при волнении моря до 2-х баллов и при отдельных соотношениях глубин источника и приёмника). Кроме того, с учётом финансовых ограничений, развивая антенну по вертикали, придётся сузить её по горизонтали, что приведёт к снижению разрешающей способности антенны в горизонтальной плоскости, что критично в условиях интенсивного надводного судоходства.

С учётом приведённых факторов целесообразными конфигурациями БА являются конфигурации, изображённые на рис. 1, а (как на ПЛА ВМС США «Virginia») и на рис. 1, б (как на ПЛА ВМС Великобритании «Vanguard»). Вариант, изображённый на рис. 1, б, проигрывает 20 % по дальности обнаружения малозумных целей варианту, изображённому на рис. 1, а, но в 2 раза выигрывает по стоимости.

При обосновании размеров БА необходимо учитывать следующие соображения:

- рабочий диапазон частот БА (а следовательно, и расстояние между отдельными датчиками) должен выбираться в соответствии с ожидаемой дистанцией обнаружения малозумных ПЛ в типовых гидроакустических условиях. При этом должна учитываться частотная зависимость аномалии распространения сигнала [6];

- ширина БА не должна превышать интервал горизонтальной пространственной корреляции сигнала на верхней частоте рабочего диапазона частот, составляющий в среднем 50 длин волн [7];

– высота антенны должна выбираться из условия, чтобы ширина характеристики направленности антенны в вертикальной плоскости в наиболее высокочастотном диапазоне была не уже  $4-5^\circ$ , чтобы собирать достаточное количество лучей сигнала в условиях сплошной акустической освещенности [4, 8].

При выборе конструкции БА необходимо учитывать следующее:

– БА должны быть покровными, т.е. должны быть ориентированными на установку снаружи прочного корпуса однокорпусной ПЛ с минимальным количеством вводов кабелей в прочный корпус [9];

– БА должны быть звукопоглощающими для обеспечения скрытности ПЛ по вторичному гидроакустическому полю, т.е. должны иметь звукопрозрачный обтекатель, звукопрозрачные датчики (например, волоконно-оптические) и звукопоглощающий экран [10];

– в конструкции БА, размещаемых в кормовой части ПЛ, должны быть применены все известные методы подавления собственных структурных и вибрационных помех [11];

– желательно, чтобы БА имели модульную конструкцию со встроенным обтекателем, упрощающую изготовление, установку и ремонт БА (рис. 2) [9, 12].

Одной из задач оснащения ПЛ бортовыми антеннами является высокоточное пассивное определение дистанции до обнаруженных целей. Наиболее эффективно эта задача решается с использованием триангуляционного и горизонтального разностно-дальномерного методов, базирующихся на обработке сигналов с двух-трёх горизонтально размещенных антенн (рис. 1, а, б) [13–15]. Для БА, основное назначение которых повышение дальности обнаружения малозумных целей, данная задача решается одновременно с обнаружением цели и дополнительными аппаратными средствами не требует. При этом необходимо иметь в виду, что высокоточное (с ошибкой порядка 10 %) определение дистанции названными методами ограничивается дистанцией до цели, равной увеличенному в 50 раз расстоянию между фазовыми центрами крайних антенн. Например, для ПЛА ВМС США «Virginia», у которой расстояние между фазовыми центрами крайних БА равно 50 м, максимальная дистанция высокоточного решения задачи составляет 2,5 км.

На некоторых иностранных ПЛ на каждом борту устанавливаются по 3 малогабаритные высокочастотные антенны системы «Rapid Location» (сокращённо «RapLoc»), предназначенные для определения дистанции до атакующих торпед. Установка на ПЛ такой системы оправдана при выполнении двух условий:

– высокоточное определение дистанции до обнаруженной торпеды не осуществляется другими средствами (например, широкоапертурными бортовыми антеннами либо специализированными высокочастотными гидролокаторами);

– на ПЛ имеются средства самообороны, для использования которых высокоточная оценка дистанции необходима.

Бортовые антенны, обеспечивающие обнаружение торпед в кормовом секторе курсовых углов и противолодочных вертолётов и самолётов во всей верхней полусфере. Ввиду значительного снижения шумности современных иностранных ПЛ и отсутствия в спектре их шумоизлучения дискретных составляющих в звуковом диапазоне частот, их обнаружение с использованием гибких протяжённых буксируемых антенн (ГПБА) перестало быть эффективным. У ГПБА осталась задача обнаружения торпед в кормовом секторе курсовых углов, затенённом для носовой и бортовых антенн, а также противолодочных вертолётов и самолётов. Однако, учитывая ограничения по использованию ГПБА, для решения этих задач на перспективные ПЛ вместо ГПБА целесообразно устанавливать линейные протяжённые бортовые антенны (ЛПБА), размещаемые побортно вдоль корпуса ПЛ выше максимальной полушироты (рис. 2).

Применение ЛПБА вместо ГПБА позволит:

– снять ограничения по маневрированию ПЛ по курсу и скорости, которые имеют место при букировке ГПБА;

– обеспечить однозначное определение пеленга обнаруженной цели;

– отказаться от установки на ПЛ габаритного и дорогостоящего устройства постановки-выборки ГПБА.

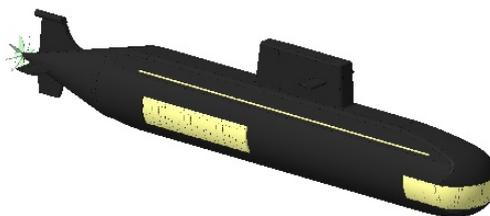


Рис. 2. Вид ПЛ, оснащённой носовой и бортовыми широкоапертурными антеннами модульной конструкции и линейными протяжёнными бортовыми антеннами.

**Заключение.** Основным назначением бортовых антенн перспективных ПЛ является обеспечение боевой устойчивости ПЛ путём: 1) своевременного обнаружения и определения координат малошумных ПЛ и АНПА противника; 2) обнаружения торпед в кормовом секторе курсовых углов и противолодочных вертолётов и самолётов во всей верхней полусфере.

Первая задача решается установкой широкоапертурных бортовых антенн, конфигурация, размеры и конструкция которых выбираются с учётом приведённых в статье факторов и ограничений.

Для решения второй задачи побортно устанавливаются линейные протяжённые бортовые антенны, имеющие ряд преимуществ перед гибкими протяжёнными буксируемыми антеннами.

#### *Литература*

1. Jane's fighting ships. 2019-2020. Ed. Alex Pape. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK. 2020.
2. Коваленко В. В., Корчак В. Ю., Хилько А. И., Чулков В. Л. Требования к сетцентрическим системам подводного наблюдения // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7, № 2. С. 22–26.
3. Спорышев М. С., Щербатюк А. Ф. Об использовании групп морских роботов для охраны водных акваторий: краткий обзор // *Подводные исследования и робототехника*. 2018. № 2 (26). С. 21–27.
4. *Акустика океана* / Под ред. Л. М. Бреховских. М.: Наука, 1976.
5. Лободин И. Е., Машошин А. И. О возможности обнаружения современных подводных лодок в дальних зонах акустической освещённости // *Морская радиоэлектроника*. 2019. № 3(69). С. 44–47.
6. Марасёв С. В., Машошин А. И. Оптимальная частота работы гидроакустических средств обнаружения в реальном океаническом волноводе // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 4. С. 85–92.
7. Lynch J.F., Duda T.F., Siegmann W.L., Holmesc J., Newhall A.E. The "Carey number" in shallow water acoustics // *Proceedings of 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics*. 2013. Kos.P.1149-1160.
8. Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю. *Гидроакустические антенны*. Л.: Судостроение, 1984.
9. Батанов А. К., Бродский Б. М., Кузьмин А. А., Машошин А. И. Новые технологии создания приёмных гидроакустических антенн подводных лодок // *Гидроакустика*. 2020 № 41(1). С. 45–52.
10. Патент РФ № 2 534 240 с приоритетом от 22.04.2013. Способ получения упругого и звукопоглощающего материала с термопластичными микросферами. Авторы: Машошин А. И., Батанов А. К., Бродский Б. М., Батанов К. А., Куц Д. А.
11. Патент РФ № 2713018 с приоритетом от 09.11.2018г. Антенный модуль. Авторы: Машошин А. И., Батанов А. К., Бродский Б. М., Кузьмин А. А., Крицин С. А.
12. Патент РФ № 2713007 с приоритетом от 24.10.2018г. Приемный гидроакустический блок. Авторы: Машошин А. И., Батанов А. К., Бродский Б. М., Кузьмин А. А., Крицин С. А.
13. Гампер Л. Е. О точности методов пассивной гидролокации с разнесенными бортовыми антеннами // *Гидроакустика*. 2009. Вып.9. С. 34–42.
14. Машошин А. И. Синтез оптимального алгоритма пассивного определения дистанции до цели // *Морская радиоэлектроника*. 2012. № 2(40). С. 30–34.
15. Кебкал К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // *Гирроскопия и навигация*. 2016. Т. 24, № 3(94). С. 115–130.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №22-29-00320).

## ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАСПОЛОЖЕНИЯХ ПРИЁМНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*V. I. Makhov*, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

## DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF THE UNDERWATER VEHICLE ANTENNA AT DIFFERENT LOCATIONS OF RECEIVING AND EMITTING ELEMENTS

*V. I. Makhov*, Ph.D.

Saint Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

*Рассмотрены 2 варианта расположения элементов малогабаритной плоской антенны, предназначенной для подводного аппарата: на concentрических окружностях и параллельными линиями. Приведены расчётные характеристики направленности (ХН) антенны. Показано, что антенна с concentрическим расположением элементов имеет ХН близкую к осесимметричной, антенна с расположением элементов параллельными линиями имеет меньший уровень боковых лепестков.*

*Two variants of the arrangement of elements of a small-sized flat antenna designed for an underwater vehicle are considered: on concentric circles and parallel lines. The calculated characteristics of the antenna directivity are given. It is shown that an antenna with a concentric arrangement of elements has directivity close to axisymmetric; an antenna with elements arranged in parallel lines has a lower level of side lobes.*

Разработка гидроакустической антенны подводного аппарата связана с необходимостью учёта противоречивых требований: при малых габаритах надо обеспечить узкий основной лепесток ХН, что повысит угловую разрешающую способность, и уменьшить боковые лепестки для увеличения эффективности антенны в режиме излучения и приёма. Повышение рабочей частоты даёт возможность при небольших габаритах антенны уменьшить ширину основного лепестка, но приводит к росту коэффициента затухания звука в среде и уменьшению дальности действия гидроакустической системы. Поэтому обычно по требуемой дальности действия находят оптимальную частоту, выбирают тип антенны, определяют её размеры и, если они позволяют разместить антенну на носителе, оценивают её возможности получения информации о подводной обстановке.

Для подводного аппарата цилиндрической формы гидроакустическая антенна может быть установлена в торцевой части цилиндра, в носовой оконечности аппарата, где уровень действующих на антенну шумов при движении аппарата минимален. В этом случае апертура антенны вписывается в круг, в пределах которого размещаются приёмно-излучающие поверхности элементов антенны. Важным вопросом является порядок размещения элементов по апертуре антенны, от которого зависят её направленные свойства, а также возможности применения того или иного алгоритма обработки информации. В работе приведены рассчитанные ХН антенн для двух видов расположения элементов: на concentрических окружностях и на параллельных линиях. На рис. 1, *a, б* точками обозначены центры расположения приёмно-излучающих элементов. Количество элементов в обеих антеннах одинаковое и равно 37.

Элементы кольцевой concentрической антенны распределены на три кольца по 8, 12 и 16 элементов, равномерно расположенных в каждом кольце, и один элемент расположен в центре антенны. В качестве элементов антенны могут использоваться стержневые преобразователи с приёмно-излучающими накладками круглой (рис. 1, *a*) или квадратной формы, поверхности которых размещены в плоскости антенны. Применение квадратных накладок увеличивает площадь активной поверхности, но при одинаковой минимальной толщине квадратная накладка имеет значительную неравномерность (8 дБ) распределения амплитуд колебаний по своей поверхности, а круглая (при диаметре равном стороне квадратной накладки) колеблется с постоянной амплитудой, то есть совершает поршневые колебания [1].

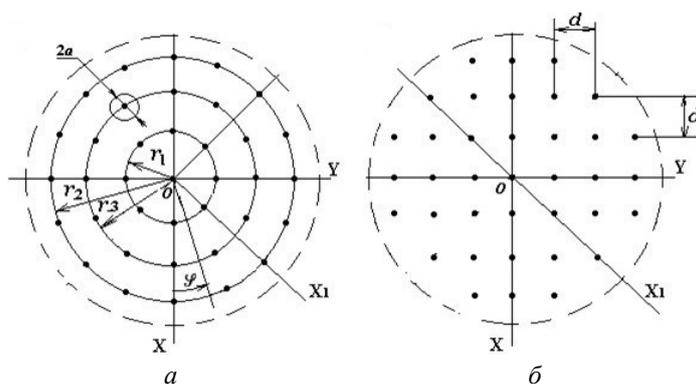


Рис. 1.

*a* — расположение элементов кольцевой концентрической антенны;  
*б* — расположение элементов на параллельных линиях.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Волновые размеры антенны невелики, радиусы окружностей, на которых расположены центры элементов антенны:  $r_1/\lambda \approx 1$ ,  $r_2/\lambda \approx 1,6$  и  $r_3/\lambda \approx 2,2$ , где  $\lambda$  — длина звуковой волны.

ХН  $m$ -ой кольцевой антенны из точечных элементов определяется выражением:

$$R_m(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \exp [jkr_m \cdot (\sin\theta \cdot \cos(\varphi - \varphi_n) - \sin\theta_k \cdot \cos(\varphi_k - \varphi_n))],$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число;  $N$  — число элементов в кольце;  $r_m$  — радиус  $m$ -го кольца;  $\theta$  и  $\varphi$  — угол места и азимутальный угол в сферической системе координат с центром в точке  $O$ ;  $\varphi_n$  — угол между осью  $OX$  и направлением на элемент с номером  $n$ , при  $n=1$  элемент расположен на оси  $OX$ ,  $\theta_k$  и  $\varphi_k$  — направление компенсации антенны.

При чётном числе элементов в кольце функция  $R_m(\theta, \varphi)$  является вещественной, так как каждой паре элементов, разнесённых на 180 градусов, соответствует сумма из двух взаимно сопряжённых экспонент. ХН всей концентрической антенны образуется в соответствии с теоремой сложения как сумма ХН кольцевых антенн и центрального элемента, имеющих общий фазовый центр, с весовыми коэффициентами, равными числу элементов [2]:

$$R_{\text{sum}} = (1 + 8 \cdot R_1(\theta, \varphi) + 12 \cdot R_2(\theta, \varphi) + 16 \cdot R_3(\theta, \varphi)) / 37.$$

Волновые размеры элементов малы и практически не влияют на  $R_{\text{sum}}$ . На рис. 2 приведены графики рассчитанных ХН кольцевой концентрической антенны в двух плоскостях  $XOZ$  ( $\varphi=0^\circ$ ) и  $X_1OZ$  ( $\varphi=45^\circ$ ).

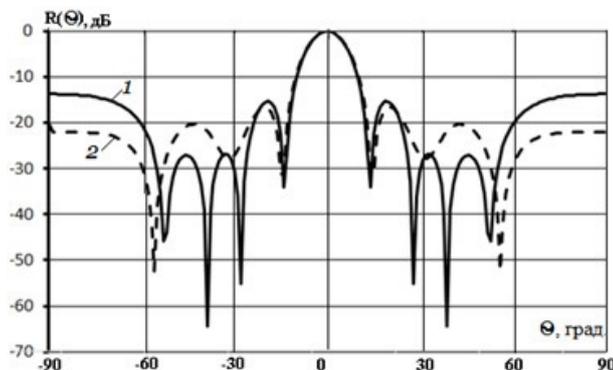


Рис. 2. Графики ХН кольцевой концентрической антенны.

1 — при  $\varphi = 0^\circ$ ; 2 — при  $\varphi = 45^\circ$ .

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

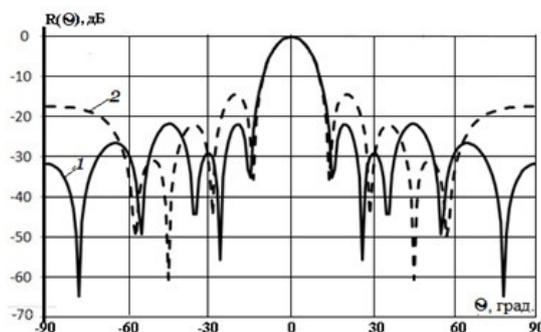


Рис. 3. Графики ХН антенны с расположением элементов параллельными линиями.

1 — при  $\varphi = 0^\circ$ ; 2 — при  $\varphi = 45^\circ$ .

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

ХН кольцевой концентрической антенны близка к осесимметричной в области основного максимума и первых боковых лепестков. В этой области графики ХН в двух плоскостях  $\varphi=0^\circ$  и  $\varphi=45^\circ$  практически совпадают, вне этой области неравномерность достигает в среднем 7–9 дБ. При других углах  $\varphi$  график ХН антенны не выходит за пределы графиков ХН в плоскостях  $\varphi=0^\circ$  и  $\varphi=45^\circ$ . В плоскостях  $\varphi=0^\circ$  и  $\varphi=90^\circ$  ХН антенны имеет одинаковую форму в силу симметрии антенны относительно осей ОХ и ОУ.

ХН антенны с расположением элементов на параллельных линиях (рис. 1, б) в плоскости ХОZ равна ХН линейной антенны из 7 элементов с коэффициентами возбуждения 3, 5, 7, 7, 7, 5, 3, образуемой при смещении элементов соответствующих горизонтальных рядов на эту плоскость. ХН антенны в плоскости Х<sub>1</sub>ОZ аналогично равна ХН линейной антенны из 9 элементов с коэффициентами возбуждения 3, 4, 5, 4, 5, 4, 5, 4, 3. Выражение для ХН линейной антенны с нечётным количеством элементов имеет вид:

$$R(\theta) = \left( A_0 + 2 \sum_{l=1}^L A_l \right)^{-1} \cdot \left[ A_0 + 2 \sum_{l=1}^L A_l \cdot \cos(lkd \sin \theta) \right],$$

где  $A_0$  и  $A_l$  — коэффициенты возбуждения центрального элемента и пары симметричных элементов;  $l$  — номер пары;  $L$  — число пар;  $d$  — расстояние между соседними элементами,  $d/\lambda=0,75$ . ХН антенны с расположением элементов параллельными линиями в плоскостях ХОZ и Х<sub>1</sub>ОZ приведены на рис. 3. Из рис. 3 видно, что ХН антенны с расположением элементов параллельными линиями существенно отличается от осесимметричной (различие первых боковых максимумов составляет в двух рассматриваемых плоскостях составляет 8,5 дБ), но уровень боковых лепестков в среднем несколько меньше уровня боковых лепестков кольцевой концентрической антенны. Ширина основного лепестка ХН для обоих вариантов расположения элементов практически одинаковая и составляет  $12^\circ$  на уровне  $-3$  дБ от максимума.

Таким образом, сопоставление ХН антенны при двух вариантах расположения приёмно-излучающих элементов показало, что при расположении элементов в виде концентрических окружностей ХН более близка к осесимметричной, чем при расположении элементов линиями, но второй вариант даёт меньший уровень боковых лепестков.

### Литература

1. Ермолаев Э. В., Махов В. И. Исследование колебаний пьезокерамического стержня с накладкой круглой и квадратной формы // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 1, № 2(44). С. 206–209.
2. Смартышев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны // Справочник. Л.: Судостроение, 1984.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАКЕТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТЕРЖНЕВОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СОСТАВЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Т. К. Богданов, М. В. Романов, И. И. Стырикович, канд. техн. наук  
АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF MODELING AND PROTOTYPING OF A BROADBAND ROD PIEZOELECTRIC TRANSDUCER AS PART OF AN ANTENNA ARRAY

T. K. Bogdanov, M. V. Romanov, I. I. Styrikovich, Ph.D.  
JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

*Рассматриваются результаты макетирования и измерений частотных характеристик стержневых пьезопреобразователей с колебаниями изгиба излучающей накладки. Приведены амплитудно-частотные характеристики как отдельных пьезопреобразователей в составе антенной решетки, так и в различных группах включения.*

*The results of prototyping and measurements of the frequency characteristics of rod piezoelectric transducers with oscillations of the bending of the radiating plate are considered. The amplitude-frequency characteristics of both individual piezoelectric transducers as part of the antenna array, and in various inclusion groups are given.*

Стержневые армированные гидроакустические преобразователи, обеспечивающие сравнительно высокие требования по давлению в режиме излучения в широком диапазоне частот, достаточно широко используются в гидролокационных системах подводных аппаратов различного назначения. В работе [1] была рассмотрена одна из конструкций такого преобразователя с использованием колебаний изгиба излучающей накладки. Она позволяет добиться оптимального соотношения габаритов преобразователя для обеспечения широкополосности и реализовать двугорбую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) эффективности в режиме излучения с рабочей полосой порядка октавы. Вид АЧХ, полученной в ходе моделирования с помощью эквивалентной схемы замещения такого преобразователя, представлен на рис. 1. Эта характеристика, обеспечивающая полосу пропускания порядка одной октавы, имеет вид двугорбой кривой, где  $f_1$  и  $f_2$  — частоты основного и дополнительного максимумов.

На основе таких преобразователей был разработан макет многоэлементного широкополосного антенного устройства, содержащего 38 приемно-излучающих каналов. Каждый из каналов представляет собой широкополосный стержневой пьезопреобразователь, фотография которого представлена на рис. 2.

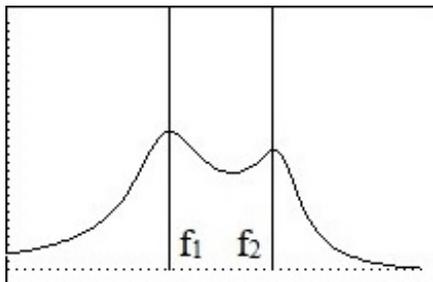


Рис. 1. АЧХ эффективности преобразователя в режиме излучения, полученная в ходе моделирования.



Рис. 2. Макет широкополосного стержневого пьезопреобразователя.

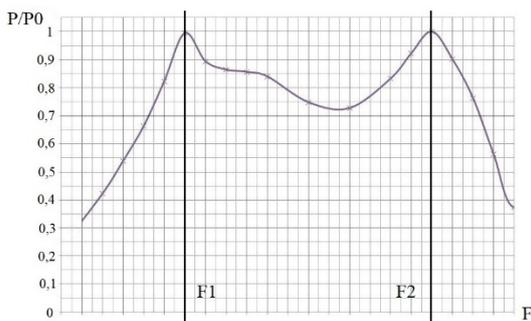


Рис. 3. Нормированная АЧХ звукового давления макета широкополосного антенного устройства в режиме излучения.

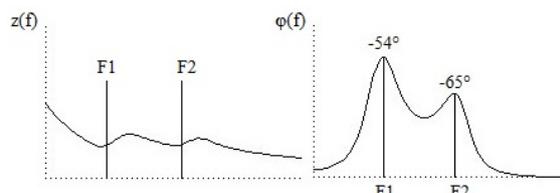


Рис. 4. Вид частотной зависимости импеданса  $z(f)$  и фазового угла  $\varphi(f)$  широкополосного преобразователя.

Конструкция такого преобразователя, помимо широкополосности, эффективно обеспечивает режим излучения большой акустической мощности.

Измеренная нормированная АЧХ звукового давления макета широкополосного антенного устройства в режиме излучения при синфазном возбуждении каналов представлена на рис. 3. Характер АЧХ очень схож с результатами моделирования, представленными ранее (рис. 1), а полоса пропускания по уровню 0,707 составляет порядка октавы.

С точки зрения работы генератора интерес представляют частотные зависимости импеданса  $z(f)$  и фазового угла  $\varphi(f)$  как антенной решетки в целом, так и одиночных каналов или групп преобразователей.

Z-метровая характеристика при моделировании одного преобразователя и всей антенной решетки имеет один и тот же характер, представленный на рис. 4.

Двугорбый характер z-метровой характеристики свидетельствует о наличии продольного F1 и выраженного изгибного F2 резонанса рабочей накладки преобразователя в режиме излучения, значения фазовых углов на максимумах указывают на хороший акустический контакт и нагруженность преобразователя на рабочую среду.

Измеренная z-метровая и фазовая характеристики макета широкополосного антенного устройства, все каналы которого соединены параллельно, представлены на рис. 5. Как видно из рис. 5, характер зависимостей импеданса и фазы в рабочей полосе частот хорошо повторяет результаты моделирования.

Также рассматривалось поведение в зависимости от частоты импеданса 7-ми групп преобразователей макета, соединенных параллельно в соответствии с 7-ю вертикальными линейками апертуры. Таким образом, зависимости импеданса и фазы от частоты 5-ти групп по 6 преобразователей и 2-х групп по 4 преобразователя представлены на рис. 6.

В свою очередь,  $z(f)$  и  $\varphi(f)$  каждого из 38 преобразователей в составе антенной решетки представлены на рис. 7.

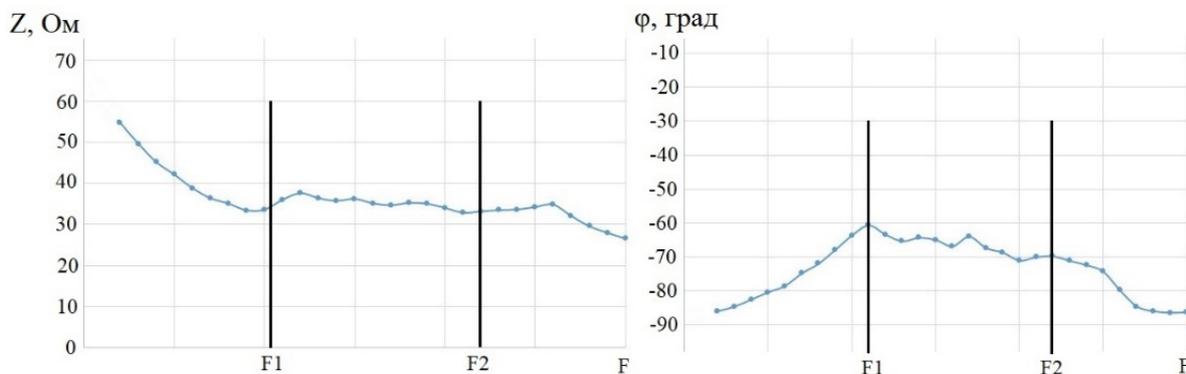


Рис. 5. Зависимости импеданса  $z(f)$  и фазового угла  $\varphi(f)$  макета широкополосного антенного устройства, все каналы которого объединены в параллельное соединение.

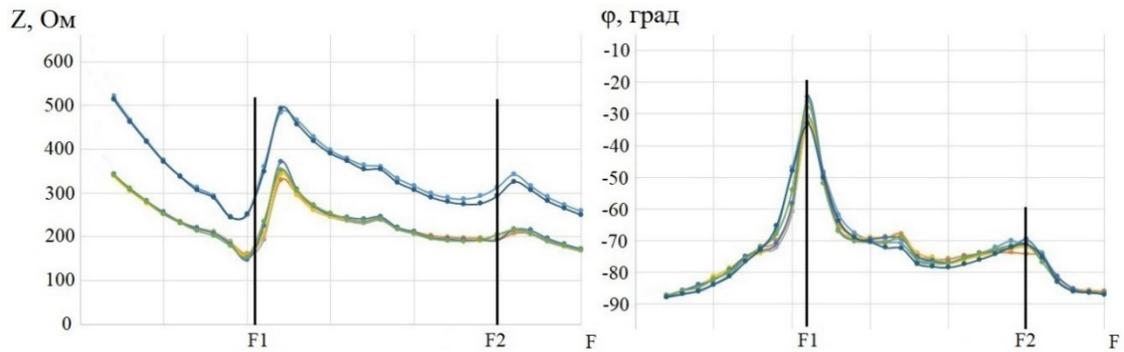


Рис. 6. Зависимости импеданса и фазы от частоты 5-ти групп по 6 преобразователей и 2-х групп по 4 преобразователя макета антенного устройства.

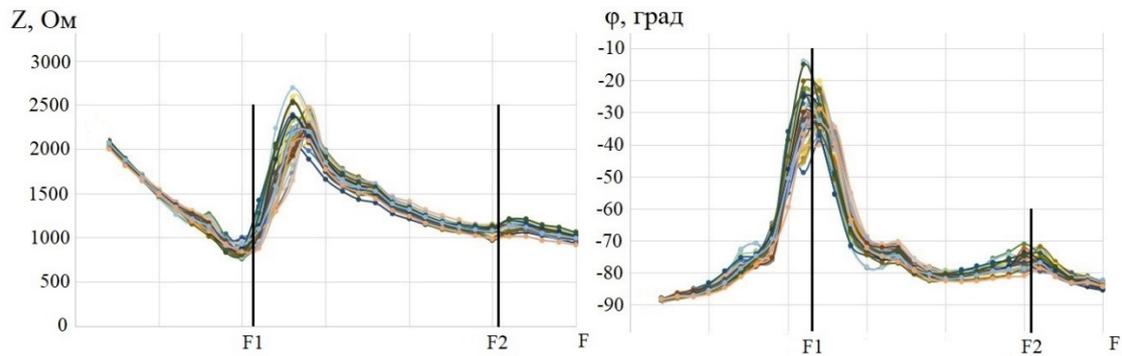


Рис. 7. Зависимости  $z(f)$  и  $\varphi(f)$  каждого из 38 преобразователей в составе антенной решетки.

По рис. 6 и 7 видно, что чем меньше преобразователей из состава антенной решетки макета участвуют в работе на среду, тем менее проявляется изгибный резонанс их излучающих накладок на  $z$ -метровой характеристике, и тем менее нагруженными они становятся при работе на продольном резонансе, о чем говорит заметный рост значения фазового угла.

Эти факторы стоит иметь в виду при работе генератора с широкополосными преобразователями антенного устройства в качестве нагрузки, в особенности в случае использования многоканальных генераторов сигналов в составе фазированных антенных решёток, реализующих работу во всех описанных интерпретациях.

#### *Литература*

1. Богданов Т. К., Стырикович И. И. Широкополосный стержневой пьезопреобразователь с использованием колебаний изгиба излучающей накладки и его эквивалентная схема замещения // Тр. Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. 600 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КАЛИБРОВКИ ВЕКТОРНОГО ПРИЁМНИКА В РЕВЕРБЕРАЦИОННОМ ЗВУКОВОМ ПОЛЕ НЕЗАГЛУШЕННОГО БАССЕЙНА

А. Е. Исаев, д-р техн. наук, Г. С. Некрич

ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская область, Россия

## EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE POSSIBILITY OF A VECTOR RECEIVER CALIBRATION IN THE REVERBERATION SOUND FIELD OF A NONANECCHOIC WATER TANK

A. E. Isaev, Dr.Sc., G. S. Nekrich

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

*В статье представлено экспериментальное подтверждение метода калибровки векторного приёмника в реверберационном звуковом поле незаглушенного бассейна. Обоснование основано на введении известного искажения в прямую волну излучателя волной, отражённой от границы раздела вода–воздух, что позволило экспериментально установить способность выделять векторную величину прямой волны излучателя в реверберационном звуковом поле бассейна и применять непрерывные полосовые сигналы для калибровки векторного приёмника в свободном поле на частотах от 500 Гц до 10 кГц.*

*The article provides an experimental confirmation of the method of calibration of a vector receiver in the reverberation sound field of a nonanechoic water tank. The essence of the experiment was to introduce reference distortions with known parameters into the projector direct wave by a sound wave reflected from the water-air interface that made it possible to experimentally establish the ability to select vector variable of the direct wave of the projector in the reverberant sound field of water tank and use continuous band signals for calibration of vector receiver in free field in the frequency range from 500 Hz to 10 kHz.*

Известным недостатком метода использования серии тонально-импульсных сигналов для калибровки является искажение сигнала переходным процессом. С уменьшением частоты продолжительность переходного процесса увеличивается и ограничивает возможности низкочастотной калибровки (рис. 1).

Выходной сигнал векторного приёмника представляет собой суперпозицию сигналов от двух разнесённых приёмных элементов. Когда принимается пакет тональных сигналов, выходной сигнал каждого приёмного элемента искажается переходным процессом. Это увеличивает со временем искажения выходного сигнала векторного приёмника.

Жёсткость подвеса векторного приёмника также увеличивает продолжительность переходного процесса. По размерам векторный приёмник намного больше гидрофона. Это вынуждает увеличивать расстояние между ним и излучателем во время калибровки, что приводит к уменьшению продолжительности устойчивой части тонального импульса, подходящей для измерения. Калибровка векторного приёмника методом тональных импульсов ниже 4–6 кГц становится проблематичной. Рассеяние звука на рамке подвеса векторного приёмника становится значительным, начиная с 4–6 кГц. Чтобы представить поведение частотной характеристики векторного приёмника на более высоких частотах, необходимо выполнить калибровку небольшими шагами по частоте.

Трудоёмкость таких измерений методом тональных импульсов недопустимо возрастает. Для калибровки векторных приёмников предпочтительно использовать методы, свободные от этих недостатков. Переходных искажений можно избежать, и получить детальную частотную характеристику свободного поля, способами, основанными на обработке частотной характеристики, измеренной в реверберирующем звуковом поле при излучении в резервуаре для воды непрерывных сигналов с распределённой по частоте мощностью. Эти методы успешно используются для калибровки гидрофона — приёмника звукового давления (скалярной величины звукового поля). Но возможность применения этих методов для калибровки виртуальной реальности не так очевидна. По сравнению со скалярными величинами механизм суммирования векторных величин более сложен.

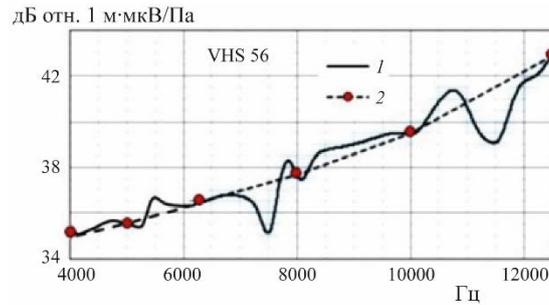


Рис. 1. Частотная характеристика чувствительности приёмника градиента давления типа VHS 56.

1 — непрерывная; 2 — на частотах 1/3 октавного ряда.



Рис. 2. Траектория перемещения векторного приёмника при воздействии тонально-импульсного сигнала (а) и в реверберационном поле (б).

Фаза выходного сигнала векторного приёмника определяется не только временными задержками отражённых волн, но и углами их падения на приёмник. При калибровке с использованием метода тонального импульса векторный приёмник колеблется коллинеарно распространению прямой волны излучателя. В ревербирующем звуковом поле форма колебаний векторного приёмника усложняется с приходом каждой отражённой волны. В результате векторный приёмник движется по сложной траектории, которая отличается от таковой при приёме тонального импульса (рис. 2).

Собственные колебания подвеса приёмника могут вызвать его дополнительную анизотропию. Всё это требует экспериментального подтверждения возможности калибровки векторного приёмника в свободном поле в ревербирующем звуковом поле бассейна.

К сожалению, разрыв в диапазоне частот, не предусмотренный другими методами первичной калибровки, препятствует такому подтверждению:

- 500–600 Гц — это наиболее высокие частоты для точной калибровки векторного приёмника в стоячей звуковой волне,
- тонально импульсный метод может применяться начиная с 6 кГц.

Результаты калибровки векторного приёмника в реверберационном звуковом поле в диапазоне от 500 Гц до 6 кГц нельзя напрямую сравнивать с результатами других первичных методов. Всё это заставляет нас искать способы, не основанные на прямом сравнении результатов измерения чувствительности векторного приёмника.

В отсутствие эталонных значений частотной характеристики векторного приёмника был проведён эксперимент, идея которого заключалась в том, чтобы ввести в измеренную частотную характеристику «эталонные» искажения с заранее известными параметрами и убедиться, что параметры искажений, измеренные в реверберационном звуковом поле, совпадают с прогнозируемыми. Если прямая волна излучателя искажается одной отражённой волной, частотная характеристика будет искажена гармоническими колебаниями. Амплитуда, период и фаза этих интерференционных колебаний напрямую определяются геометрическими параметрами эксперимента и коэффициентом отражения.

В качестве отражающей поверхности была выбрана водная поверхность бассейна. Поверхность раздела вода–воздух обладает следующими замечательными свойствами:

- отражение звука близко к 100 % и не зависит от частоты;

- фаза отражения точно известна как для звукового давления, так и для векторных величин и не зависит от частоты;
- большие размеры бассейна обеспечивают незначительное влияние краевых эффектов;
- соотношение длины волны и размера бассейна позволяет использовать уравнения геометрической акустики.

В эксперименте излучатель и приёмник колебательной скорости были расположены в резервуаре для воды таким образом, что первое отражение было отражением от поверхности воды. Были излучены непрерывные сигналы и измерена частотная зависимость импеданса передачи пары излучатель–векторный приёмник в реверберирующем звуковом поле. Используя метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ), интерференционные колебания, вызванные отражением звука от границ бассейна, были подавлены, а колебания, вызванные отражением от поверхности раздела вода–воздух, были сохранены.

В присутствии прямой и одной отражённой гармонических волн точечного источника для звукового давления  $\dot{p}_\Sigma(f)$  в точке размещения ВП можем записать:

$$\dot{p}_\Sigma(f) = \frac{r_0}{r_{dir}} \dot{p}_o(f) + \frac{r_0}{r_{ref}} \dot{p}_o(f) \dot{W}_{ref}(f) e^{-j(k\Delta r)} = \frac{r_0}{r_{dir}} \dot{p}_o(f) \left[ 1 + \frac{r_{dir}}{r_{ref}} \dot{W}_{ref}(f) e^{-j(k\Delta r)} \right], \quad (1)$$

где волновое число  $k = 2\pi f/c$ ;  $f$  — частота;  $c$  — скорость звука в воде;  $\Delta r$  — разность хода прямой  $r_{dir}$  и отражённой  $r_{ref}$  волн;  $\dot{W}_{ref}(f)$  — комплексный коэффициент отражения по звуковому давлению;  $\dot{p}_o(f)$  — звуковое давление, создаваемое точечным источником на опорном расстоянии  $r_0$ .

В правой части выражения (1) множитель  $\frac{r_0}{r_{dir}} \dot{p}_o(f)$  описывает поведение в точке приёма частотной зависимости звукового давления точечного источника. Множитель в квадратных скобках описывает изменения звукового давления в точке приёма вследствие интерференции прямой и отражённой звуковых волн. Интерференционная осцилляция  $\dot{\Omega}_p(f) = \frac{r_{dir} \dot{p}_\Sigma(f)}{r_0 \dot{p}_o(f)} - 1$  описывается гармонической функцией с амплитудой  $\frac{r_{dir}}{r_{ref}} |\dot{W}_{ref}(f)|$ , фазой  $\arg(\dot{W}_{ref}(f))$  и имеющим размерность частоты периодом  $\Delta f = \frac{c}{\Delta r}$ . Нетрудно проверить, что в присутствии единственной отражённой волны таким же выражением описывается интерференционная осцилляция частотной зависимости передаточного импеданса (ПИ) пары излучатель–приёмник [2]. При отражении звуковой волны от границы вода–воздух модуль и аргумент коэффициента отражения будем принимать равными единице и  $\pi$  соответственно.

В поле сферической звуковой волны на расстоянии  $r$  от точечного излучателя колебательная скорость  $\dot{v}(f)$  связана со звуковым давлением соотношением [1]:

$$\dot{v}(f) = \frac{1}{\rho c} \frac{\sqrt{k^2 r^2 + 1}}{r} \dot{p}(f) e^{-jarct(1/kr)}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность воды.

Когда сферическая звуковая волна падает на поверхность воды, звуковое давление на границе раздела вода–воздух равно нулю, а колебательная скорость максимальна. Следовательно, на границе раздела сред фазы звукового давления в прямой и отражённой волнах противоположны, а фазы колебательной скорости для обеих волн совпадают.

Поскольку направление вектора распространения отражённой волны обратное, фаза колебательной скорости и звукового давления в отражённой волне совпадают с точностью до сдвига фазы, вызванного сферичностью волны.

Такая ситуация возникает, когда излучатель расположен между векторным приёмником и границей вода–воздух (схема Б на рис. 3). Если излучатель и векторный приёмник поменялись местами (схема А на рис. 3) тогда прямая и отражённая волны будут падать на приёмник с противоположных направлений, и фаза интерференционных колебаний изменится на противоположную.

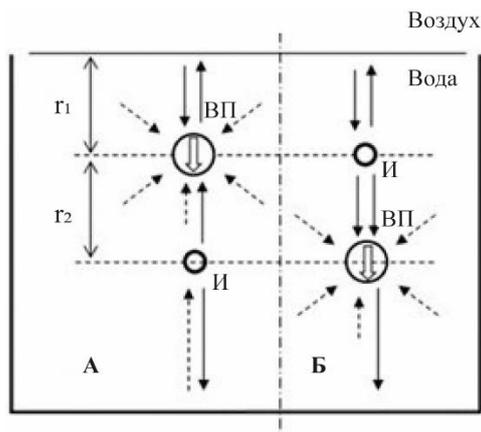


Рис. 3. Расположение излучателя, ВП и границы раздела сред.

Прямая и отражённая волны падают на ВП в противоположных направлениях — А; в опорном направлении — Б.

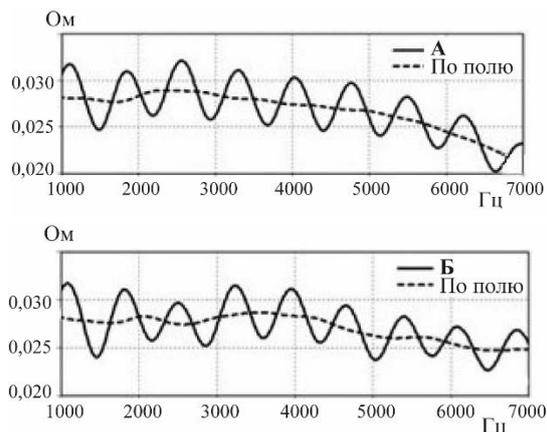


Рис. 4. Частотные зависимости ПИ пары излучатель–гидрофон по полю и искажённые отражением от водной поверхности, полученные при размещении пары по схемам А и Б.

Если вместо векторного приёмника используется гидрофон (приёмник звукового давления), то интерференционные колебания будут одинаковыми для обоих местоположений.

На рис. 4 показаны интерференционные колебания импеданса передачи излучатель-гидрофон при размещении пары в соответствии с диаграммами А и Б. Интерференционные колебания практически идентичны, амплитуда, период и фаза колебаний однозначно определяются геометрическими параметрами эксперимента и практически не зависят от частотных свойств излучателя и приёмника (рис. 5). На рис. 6 показаны импедансы передачи излучатель-векторный приёмник, когда пары расположены в соответствии с диаграммами А и Б, с геометрическими параметрами, аналогичными для эксперимента с гидрофоном.

Разницу в поведении интерференционных колебаний иллюстрируют различия в суммировании скалярных и векторных значений звуковых волн. Когда расположение пары излучатель-векторный приёмник изменяется с А на Б, амплитуда и период колебаний не изменяются, но фаза изменяется на  $\pi$ . При размещении приёмника в соответствии со схемой Б интерференционные колебания пар излучатель-гидрофон и излучатель-векторный приёмник совпадают (рис. 7).

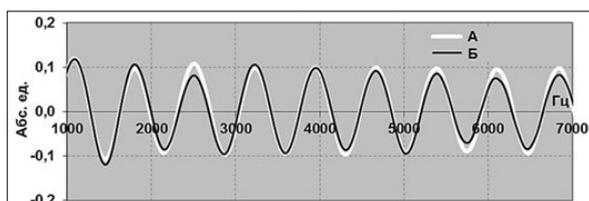


Рис. 5. Интерференционные осцилляции ПИ пары излучатель–гидрофон при размещении пары по схеме А и Б.

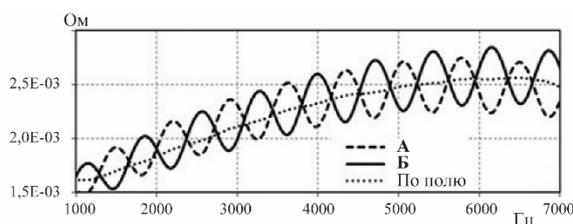


Рис. 6. Полученные в экспериментах А и Б частотные зависимости ПИ пары излучатель–ВП по полю и искажённые отражением от водной поверхности.

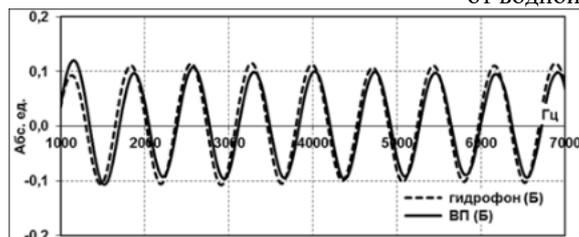


Рис. 7. Интерференционные осцилляции модуля ПИ пары излучатель–гидрофон и пары излучатель–ВП, размещённых по схеме Б.

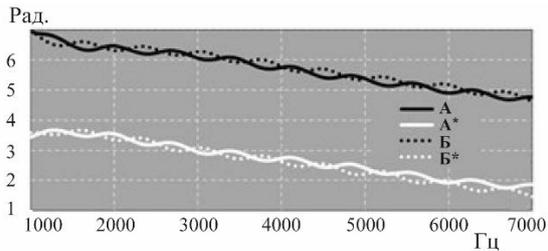


Рис. 8. Фазочастотные зависимости ПИ пары излучатель–ВП при размещении по схемам А и Б и изменении опорного направления ВП.

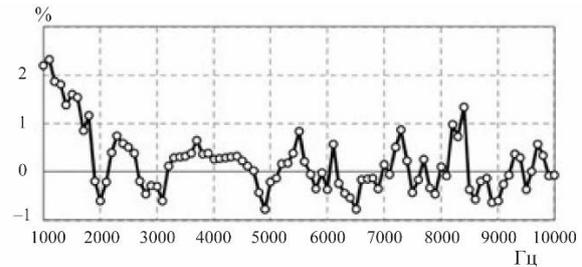


Рис. 9. Отклонения звукового давления, измеренного ВП от звукового давления, созданного в точке расположения ВП образцовым излучателем.

Ещё одним подтверждением правильности калибровки векторного приёмника в реверберационном звуковом поле являются фазово-частотные зависимости, полученные, когда приёмник расположен в соответствии с диаграммами А и Б, и направление отсчёта векторного приёмника меняется на противоположное. Когда приёмник ориентирован в противоположном направлении, фазово-частотные зависимости сохраняют своё поведение, включая поведение интерференционных колебаний, но смещены на  $\pi$  радиан (рис. 8). Точки перегиба фазово-частотных искажений соответствуют экстремумам интерференционных колебаний модуля передаточного сопротивления. Представленные закономерности соответствуют правилам суммирования векторов колебательной скорости прямых и отражённых от поверхности воды звуковых волн. Для приёмника скалярной величины — гидрофона — фазово-частотные зависимости накладываются друг на друга с точностью, определяемой направленностью приёмника. Независимым подтверждением точности калибровки векторного приёмника в свободном поле было измерение с использованием векторного приёмника звукового давления, создаваемого эталонным излучателем. Чувствительность векторного приёмника определяли с использованием методики СКВУ. Эталонный излучатель (обратимый гидрофон) был откалиброван методом взаимности. Колебательная скорость, измеренная с помощью векторного приёмника, была пересчитана в звуковое давление, которое сравнивалось со звуковым давлением эталонного излучателя в точке расположения векторного приёмника (рис. 9). В диапазоне частот от 1 до 10 кГц отклонения значений звукового давления не превышали 2,5 %. Это можно считать хорошим совпадением для калибровки с использованием базового метода. Предложенный метод, основанный на введении известного искажения в прямую волну излучателя волной, отражённой от границы раздела вода–воздух, позволил экспериментально установить способность выделять векторную величину прямой волны излучателя в реверберационном звуковом поле бассейна и применять непрерывные полосовые сигналы для калибровки векторного приёмника в свободном поле на частотах от 500 Гц до 10 кГц. Использование технологии СКВУ позволяет полностью охватить частотный диапазон тонально-импульсного метода и расширить калибровку векторных приёмников в свободном поле до частот камеры со стоячей звуковой волной.

Результаты проведённого эксперимента дают основания для использования векторных приёмников для измерений акустического импеданса материалов в свободном поле в бассейне, что позволяет, благодаря свойствам направленности векторных приёмников, уменьшить влияние краевых эффектов образца исследуемого материала.

#### Литература

1. Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
2. Исаев А. Е., Николаенко А. С. Калибровка в лабораторном бассейне рекордера с вынесенным гидрофоном // Измер.техн. 2018. № 07. С. 62–65.
3. Исаев А. Е., Матвеев А. Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне // Акуст. жур. 2009. Т. 55, № 6 С. 727–736.
4. Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Некрич Г. С., Поликарпов А. М. Комплексная градуировка приёмника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности // Акуст. жур. 2014. Т. 60, № 1. С. 48–55.

## ОБ ИЗЛУЧЕНИИ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ С АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

И. С. Пестерев, канд. техн. наук, Б. Г. Степанов<sup>1</sup>, канд. техн. наук  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Россия

## ON THE RADIATION OF SHORT PULSES BY PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS WITH AMPLITUDE-PHASE EXCITATION

I. S. Pesterev, Ph.D., B. G. Stepanov<sup>1</sup>, Ph.D.

JSC «Concern «CSRI «Elektroprigor», St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI», Russia

*Рассматривается возможность излучения коротких акустических импульсов сверхширокополосными пьезопреобразователями с амплитудно-фазовым возбуждением. Обсуждается влияние на структуру акустических импульсов изменения их длительности, частоты формирования, вида задаваемых амплитудно- и фазочастотных характеристик излучения и расширения волнового фронта. Приводятся результаты расчетов и экспериментальных исследований.*

*The possibility of radiation of short acoustic pulses by ultra-wide-band piezoelectric transducers with amplitude-phase excitation is considered. The influence on the structure of acoustic pulses of changes in their duration, frequency of formation, the type of specified amplitude and phase-frequency characteristics of radiation and the expansion of the wavefront is discussed. The results of calculations and experimental studies are presented.*

В работах [1, 2] исследовались полевые и импульсные характеристики стержневых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением (ПАФВ) их двух частей (секций) согласно решению задачи синтеза, основанной на задании равномерной амплитудно-частотной (АЧХ) и линейной фазочастотной (ФЧХ) характеристик излучения. Была продемонстрирована возможность получения такими преобразователями достаточно широкой полосы частот (порядка 2 октав), а также — перестраиваемых по частоте коротких (1–1,5 периодов колебаний) акустических импульсов [2]. Результаты экспериментальных исследований макетов антенн, составленных из ПАФВ, в целом подтвердили данные расчетов, однако выяснилось также, что получаемая форма указанных импульсов и значения частот их формирования не полностью соответствуют задаваемым параметрам в рамках рассматриваемой расчетной модели, использующей приближение плоских волн. Так, например, при планировании излучения однопериодного акустического импульса макетом антенны, составленной из стержневых ПАФВ согласно решению задачи синтеза, как правило, формируется акустический импульс, содержащий дополнительный полупериод. В связи с этим были выполнены дополнительные исследования, направленные на выяснение причин возникающих несоответствий.

Для двухсекционных стержневых ПАФВ согласно решению задачи синтеза, возможная полоса пропускания зависит от соотношения длин  $l_1$  и  $l_2$  их пьезоактивных частей (секций), определяемого параметром  $p = l_1 / (l_1 + l_2)$ , и областью частот осцилляций отношения амплитуд возбуждающих напряжений  $U_{21}(\omega) = U_{2m}(\omega) / U_{1m}(\omega)$ , которая ограничена резким ростом их значений [1]. В качестве примера на рис. 1 приведены АЧХ излучения (чувствительности  $v_{\text{и}}$  [Па·м/В]) для двух макетов антенн с номерами 1 ( $p = 0,5$ , содержит 5×6 ПАФВ) и 2 ( $p = 0,75$ , содержит 8×8 ПАФВ); кривая 4 — задаваемая АЧХ излучения по задаче синтеза, вид и уровень которой функционально определяется  $F_m(\omega)$  [1], [2], где  $\omega$  — круговая частота;  $F(\omega) = F_m(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$  — задаваемая функция излучения;  $\varphi(\omega)$  — ФЧХ излучения. Согласно задаче синтеза  $F_m(\omega) = \text{const}$  в заданном диапазоне частот, а  $\varphi(\omega)$  — линейная функция [1].

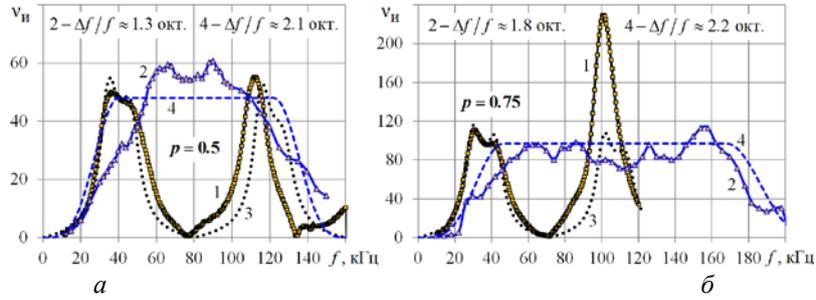


Рис. 1. АЧХ излучения макетов 1 (а) и 2 (б).

1 и 3 — синфазное возбуждение; 2 и 4 — ПАФВ согласно решению задачи синтеза;  
1 и 2 — эксперимент; 3 и 4 — расчет.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

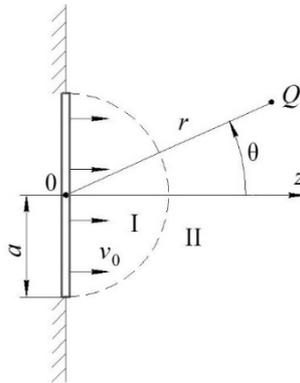


Рис. 2. Расчетная модель поршня в жестком экране.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Спектральная функция радиоимпульса амплитудой  $A_{им}$ , содержащего  $m$  периодов с частотой  $\omega_{им}$ , определяется как:  $\Phi(\omega) = \frac{j2A_{им}}{\omega_{им}} \frac{\sin\omega\tau_{им}m}{1 - (\omega/\omega_{им})^2} \cdot \exp[-j\omega\tau_{им}m]$ , где  $\omega_{им} = 2\pi f_{им}$ ;

$\tau_{им} = 1/2f_{им}$ ;  $m = 1; 2, \dots$ . Амплитудно-временная зависимость излученного акустического сигнала (импульса), ввиду симметрии спектральной функции, с точностью до постоянного множителя может быть определена по формуле [2]:  $s_{ак}(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_B} F(\omega)\Phi(\omega)e^{j\omega t} d\omega$ , где  $\omega_B$  —

верхний предел интегрирования, определяющий полноту спектральных составляющих в функции  $\Phi(\omega)$ , например, по уровню  $\Phi_{\min}(\omega)/\Phi_{\max}(\omega) \leq 0,1$ . В данном случае выражение для  $s_{ак}(t)$  определяет акустический сигнал (импульс) в приближении плоских волн. Для реальной акустической системы (антенны) на формируемый ею сигнал будет влиять как соотношение частотных характеристик полосы пропускания ПАФВ и ширины спектра сигнала, так и расхождение волнового фронта, обусловленное конечностью апертуры антенны.

Оценим это влияние с помощью модели круглого поршня радиусом  $a$  (рис. 2), который расположен в жестком экране и совершает гармонические колебания вдоль оси  $z$  с амплитудой колебательной скорости  $v_0$ , пропорциональной функции  $F(\omega)$ . При проведении расчетов воспользуемся структурой решения [3], основанного на методе частичных областей. Звуковое давление во внешней области II определяется общим решением для сферических волн в полупространстве:

$$p_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n h_{2n}^{(1)}(kr) P_{2n}(\cos\theta), \quad (1)$$

где  $B_n$  — неизвестные коэффициенты;  $h_{2n}^{(1)}(kr)$  — сферическая функция Ханкеля первого рода;  $P_{2n}(\cos\theta)$  — полиномы Лежандра;  $k = \omega/c$ ;  $c$  — скорость звука в воде.

Решение для области I состоит из двух слагаемых: первое подобно (1), но со сферической функцией Бесселя  $j_{2n}(kr)$  в качестве радиальной компоненты, а второе должно обеспечивать условие излучения на поверхности поршня  $\left. \frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p_I}{\partial z} \right|_{z=0} = F(\omega)$  ( $\rho$  — плотность воды) и соответствовать плоской волне, распространяющейся вдоль оси  $z = r\cos\theta$ . В итоге общее решение в области I запишем в виде:  $p_I = \sum_{n=0}^{\infty} A_n j_{2n}(kr) P_{2n}(\cos\theta) + \rho c F(\omega) e^{jkr\cos\theta}$ . Неизвестные коэффициенты  $A_n$  и  $B_n$  определяются из условий сопряжения звуковых давлений и колебательных скоростей на границе частичных областей I и II:

$$p_I = p_{II}; \quad \left. \frac{\partial p_I}{\partial r} = \frac{\partial p_{II}}{\partial r} \right\} \text{ при } r = a \text{ и } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

После подстановки выражений для звуковых давлений  $p_I$  и  $p_{II}$  в систему уравнений (2) и ее преобразований с учетом свойства ортогональности полиномов Лежандра  $P_{2n}(\cos\theta)$  [4], может быть получена бесконечная ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) система линейных алгебраических уравнений, решение которой осуществляется методом редукции:

$$\begin{cases} j_{2n}(ka)A_n + \rho c F(\omega)I_n^{(1)} - h_{2n}^{(1)}(ka)B_n = 0; \\ j'_{2n}(ka)A_n + j\rho c F(\omega)I_n^{(2)} - h_{2n}^{(1)'}(ka)B_n = 0, \end{cases} \quad \text{где} \quad \begin{cases} I_n^{(1)} = (4n+1) \int_0^{\pi/2} e^{jka\cos\theta} P_{2n}(\cos\theta) \sin\theta d\theta; \\ I_n^{(2)} = (4n+1) \int_0^{\pi/2} e^{jka\cos\theta} P_{2n}(\cos\theta) \cos\theta \sin\theta d\theta. \end{cases}$$

В итоге, выражение для излучаемого акустического сигнала можно представить в виде:

$$s_{\text{ак}}^{\text{II}}(t) = 2\text{Re} \int_0^{\omega_B} p_{\text{II}}(\omega) \Phi(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad \text{где } p_{\text{II}}(\omega) \text{ — звуковое давление (1), которое учитывает как}$$

расхождение волнового фронта, так и задаваемую частотную характеристику излучения  $F(\omega)$ .

В качестве примера, для макета 1 на рис. 3 приведены результаты расчетов акустических импульсов  $s_{\text{ак}}^{\text{II}}(t)$  и  $s_{\text{ак}}^{\text{II}}(t)$ , нормированных к максимальному значению в полосе частот, а также  $s_{\text{ак}}^{\text{ЭКС}}(t)$  — экспериментально полученные при возбуждении ПАФВ согласно решению задачи синтеза, когда к излучению задавался однопериодный импульс ( $m = 1$ ) на частоте  $f_{\text{ИМ}}$ . Здесь  $s_{\text{ак}}^{\text{II}}(t)$  — результаты расчетов для поршня, площадь излучения которого соответствует апертуре антенны макета 1. Как видно, учет расхождения волнового фронта и направленных свойств антенны позволяет улучшить соответствие результатов расчетов и экспериментов при излучении коротких акустических импульсов. Ограниченность области частот осцилляций отношения амплитуд  $U_{21}(\omega)$  и, соответственно, ширины полосы пропускания задаваемой АЧХ излучения приводит к тому, что при перестройке задаваемой частоты  $f_{\text{ИМ}}$  формирования короткого акустического импульса основная область его спектральной функции  $\Phi(\omega)$  со своим максимумом может выйти за нижнюю или верхнюю границу рабочего диапазона частот ПАФВ. Это приводит к обеднению спектральных составляющих, участвующих в формировании акустического импульса и появлению дополнительных колебаний в его структуре, а также — изменению его истинной частоты формирования  $\omega_{\text{ф}} = 2\pi f_{\text{ф}}$  относительно заданной  $\omega_{\text{ИМ}}$ .

Оценка этого изменения по разнице длительности полупериодов (центральных положительных, см., например, рис. 3) заданного и полученного акустических импульсов с последующим пересчетом в частотную область показала следующее. Выход области основного лепестка спектральной функции за низкочастотную границу задаваемой АЧХ излучения приводит к уменьшению длительности импульса относительно её заданной величины, т.е. к повышению  $f_{\phi}$  относительно  $f_{им}$ , а за высокочастотную границу АЧХ — к увеличению длительности импульса относительно её заданной величины, т.е. к снижению  $f_{\phi}$  относительно  $f_{им}$ . В последнем случае это отклонение может достигать 30 %. Указанное обстоятельство уменьшает диапазон перестройки коротких импульсов примерно в 1,5 раза относительно полосы пропускания задаваемой АЧХ излучения. Отставание  $f_{\phi}$  относительно  $f_{им}$  с повышением частоты также можно проиллюстрировать результатами измерения и расчетов характеристик направленности (ХН), представленными на рис. 4. Как видно, при излучении короткого импульса начиная с  $f_{им} \approx 80$  кГц ХН практически перестает изменяться. Для сопоставления здесь же приведены ХН (кривые 5), полученные при использовании радиоимпульса, содержащего 12 периодов колебаний частотой  $f_{им} = 100$  кГц. При излучении коротких импульсов побочные лепестки ХН не проявляются, что коррелирует с [5]. Согласно данным расчетов и измерений структура акустического короткого импульса, определенная на оси антенны (поршня), сохраняется в сравнительно небольших пределах ширины основного лепестка ХН ( $R(\theta) \leq 0.7$ ), затем она постепенно «разваливается», превращаясь в радиоимпульс (рис. 4, в).

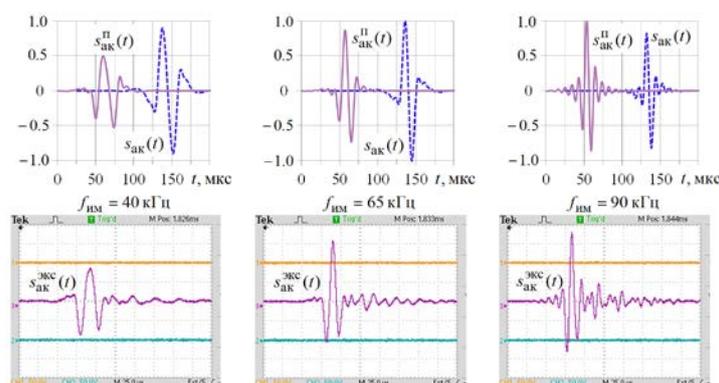


Рис. 3. Сопоставление импульсных характеристик макета 1 и двух расчетных моделей. Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

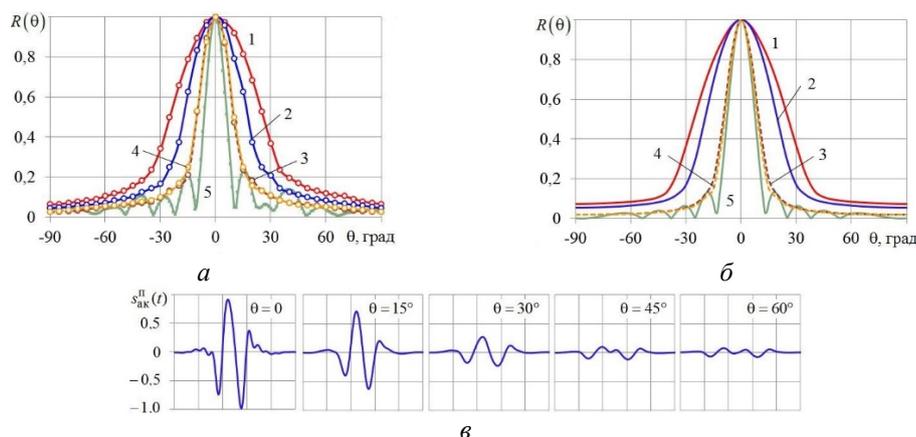


Рис. 4. Экспериментальные ХН макета 1 (а) и расчетные ХН круглого поршня равной площади (б) при формировании однопериодного импульса с заданной частотой  $f_{им}$ .

1 — 30 кГц; 2 — 40 кГц; 3 — 80 кГц; 4 — 100 кГц и радиоимпульса с  $f_{им} = 100$  кГц (кривая 5).

Изменение однопериодного импульса ( $f_{им} = 40$  кГц) при увеличении угла наблюдения  $\theta$  (в).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

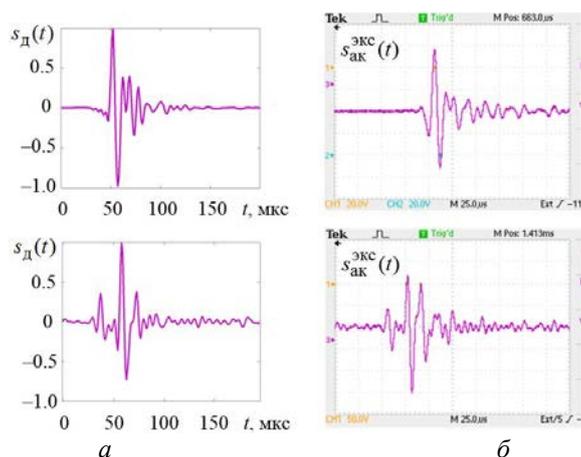


Рис. 5. Оцифрованные реальные сигналы дельфинов (а) и излученные макетом 2, составленным из ПАФВ (б). Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Непосредственное измерение задаваемой ФЧХ излучения для ПАФВ в диапазоне частот порядка 2 октав является достаточно сложной задачей. Однако, возможность управления ФЧХ излучения для ПАФВ согласно решению задачи синтеза может быть опосредовано показана на примере получения акустических сигналов  $s_{ак}^п(t)$  и  $s_{ак}^{экс}(t)$ , а также формирующих их электрических импульсов возбуждения  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  [2]. В этом случае задание разных, но линейных ФЧХ излучения практически не отражается на виде акустических сигналов, опорный импульс возбуждения  $u_1(t)$ , соответствующий задаваемому импульсу излучения, тоже остается неизменным, а корректирующий импульс возбуждения  $u_2(t)$  существенно изменяется как по форме, так и по сдвигу по времени относительно  $u_1(t)$ .

Несмотря на указанные обстоятельства, макеты ПАФВ и система их возбуждения согласно решению задачи синтеза [2] позволяют излучать более сложные по форме акустические сигналы, например, коммуникационные и эхолокационные сигналы дельфинов (рис. 5). Средняя частота спектра таких сигналов составляет 80...120 кГц, поэтому используется макет 2 (рис. 1, б). Акустические сигналы  $s_d(t)$  соответствуют оцифрованным, нормированным по амплитуде реальным сигналам дельфинов (данные Лаборатории морской биоакустики СПбГУ, масштаб развертки 25 мкс/дел.). Как видно, излученные макетом 2 акустические сигналы вполне удовлетворительно отображают структуру исходных сигналов дельфинов.

В заключении отметим, что при формировании коротких акустических импульсов с помощью ПАФВ согласно решению задачи синтеза их форма не зависит от параметров пассивных слоев (накладок), а амплитуда этих сигналов определяется заданным уровнем равномерного участка АЧХ излучения (в данном случае  $F_m(\omega) = \text{const}$ ).

### Литература

1. Степанов Б. Г. О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // Акуст. жур. 2009. Т. 55, № 3. С. 407–414.
2. Степанов Б. Г. Об излучении коротких акустических сигналов стержневыми преобразователями с фазированным возбуждением их двух частей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 8. С. 67–75.
3. Вовк И. В., Гринченко В. Т., Мацыпура В. Т. Волновые задачи акустики. Киев: Интерсервис, 2013. 572 с.
4. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.
5. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Влияние переходных процессов в преобразователях на направленность антенны в импульсном режиме // Акуст. жур. 1994. Т. 40, № 3. С. 457–458.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

*V. K. Dolya*, канд. техн. наук, *S. N. Galiy*, *A. A. Panich*, д-р техн. наук

Институт высоких технологий и пьезотехники ЮФУ, НКТБ «Пьезоприбор», Ростов-на-Дону, Россия

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A PLATE PIEZOELECTRIC TRANSDUCER OF A MULTIPLE HYDROACOUSTIC ANTENNA

*V. K. Dolya*, Ph.D., *S. N. Galiy*, *A. A. Panich*, Dr.Sc.

Institute of Advanced Technologies and Piezotechnics SFedU, R&D Design Office «Piezopribor», Rostov-on-Don, Russia

*В работе представлены результаты теоретического анализа особенностей трёхмерных колебаний пьезоэлектрической пластины конечных размеров. Показано, что спектр резонансных частот и величина эффективного коэффициента электромеханической связи на рабочей резонансной частоте пластины зависят от соотношения её размеров. Выявлены области соотношений размеров, для которых характерно сближение продольных и поперечных мод колебаний и, соответственно, значительное увеличение эффективного коэффициента связи относительно «классических» одномодовых преобразователей. Сформулированы условия эффективного использования преобразователей на нескольких частотах. Приведены результаты экспериментальных исследований оптимизированных преобразователей в составе антенны.*

*The paper presents the results of a theoretical analysis of the features of three-dimensional oscillations of a piezoelectric plate of finite dimensions. It is shown that the spectrum of resonant frequencies and the value of the effective coefficient of electromechanical coupling at the working resonant frequency of the plate depend on the ratio of its dimensions. The areas of size ratios, which are characterized by the convergence of longitudinal and transverse vibration modes and, appropriately, a significant increase in the effective coupling coefficient relative to «classical» single-mode converters, are revealed. The conditions for the efficient use of converters at several frequencies are formulated. The results of experimental studies of optimized transducers as part of the antenna are presented.*

Современные гидроакустические многоэлементные антенны представляют собой набор пьезоэлектрических преобразователей, геометрические размеры и пространственное расположение которых зависит от рабочей частоты и требуемой характеристики направленности (ХН). Как правило, для низкочастотной области используют стержневые преобразователи, а для высокочастотной (частота более 100 кГц) — пластинчатые [1].

В частности, линейные многоэлементные антенны проектируются в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 1.

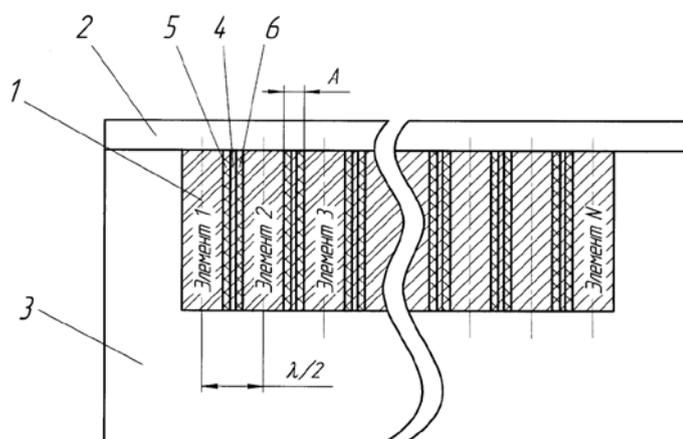


Рис. 1. Функциональная схема линейной многоэлементной антенны [2, 3].

1 — пьезоэлектрический преобразователь; 2 — герметизирующий слой; 3 — корпус антенны;  
4, 5, 6 — элементы акустической развязки.

В соответствии с устоявшимся подходом геометрические размеры преобразователя выбираются из следующих соображений:

- высоту  $a$ , рассчитывают из условия  $a = 0,5\lambda_k = \frac{0,5C_k}{f}$  ( $\lambda_k = \frac{C_k}{f}$ , длина волны в теле пьезоэлектрического элемента (ПЭ);  $C_k$  — скорость звука в ПЭ;  $f$  — рабочая частота);
- длину  $l$  рассчитывают из условия необходимости обеспечения требуемой ширины ХН, определяемой длиной  $l$  ( $\sin \varphi \sim \frac{\lambda_b}{l}$ ,  $\varphi$  — угловой раcтвор главного лепестка;  $\lambda_b$  — длина волны в воде);
- шаг расположения и количество элементов выбирают из условия необходимости обеспечения требуемого угла отклонения ХН в заданном секторе сканирования, ширины ХН и др. требований [4].

Следует отметить, что ПЭ должен совершать вдоль высоты  $a$  одномодовые колебания близкие к поршневым, что соответствует условию  $a > b, l$  ( $b$  — ширина элемента). Поэтому для остронаправленных антенн ( $\varphi < 30^\circ$ ) выполнение указанного условия приводит к необходимости изготавливать каждый элемент антенны из сборки нескольких ПЭ, длина  $l$  которых удовлетворяет приведенному условию, а общую длину сборки, соответствующей сумме длин собираемых элементов, подбирать, исходя из требования по углу раствора ХН.

В настоящей работе на основе результатов моделирования методом конечных элементов сформулированы рекомендации по оптимизации параметров пластинчатых резонансных ПЭ, имеющих произвольное соотношение размеров и совершающих объемные многомодовые колебания. В качестве объекта моделирования рассмотрим два типа пьезоэлементов (рис. 2) ПЭ поляризован по высоте (вектор  $\mathbf{E}$  вдоль направления излучения, пьезомодуль  $d_{33}$  и ПЭ поляризован по ширине (перпендикулярно направлению излучения, пьезомодуль  $d_{31}$ ).

ПЭ одной излучающей стороной нагружены на полупространство, моделирующее излучение в водную среду, с одной стороны ограниченное «жестким» акустическим экраном, а с другой стороны «идеально» согласованным слоем, который поглощает всю энергию падающей звуковой волны без какого-либо несоответствия импедансов и исключает переотражения. Один из размеров — ширина  $b$  выбрана из условия  $b \leq 0,3a$ . В качестве критерия эффективности преобразователя использован эффективный коэффициент электромеханической связи  $K_e$  преобразователя [5], как параметр, наиболее полно отражающий эффективность электромеханического преобразователя. Результаты расчетов представлены на рис. 3–6.

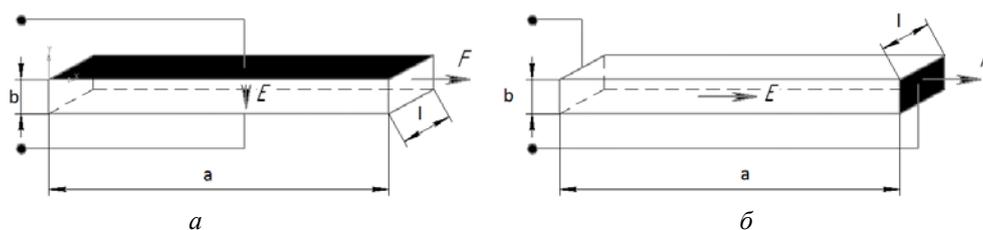


Рис. 2. Исследуемые ПЭ.

$a$  — поперечное направление поляризации ( $d_{31}$ );  $b$  — продольное направление поляризации ( $d_{33}$ ).

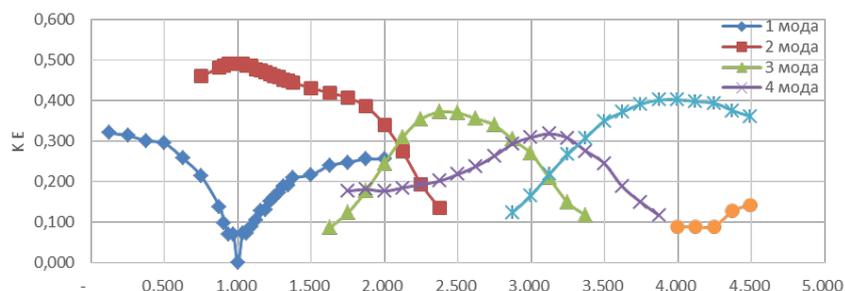


Рис. 3. Зависимость  $K_e$  от отношения длины к высоте (поперечная поляризация).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

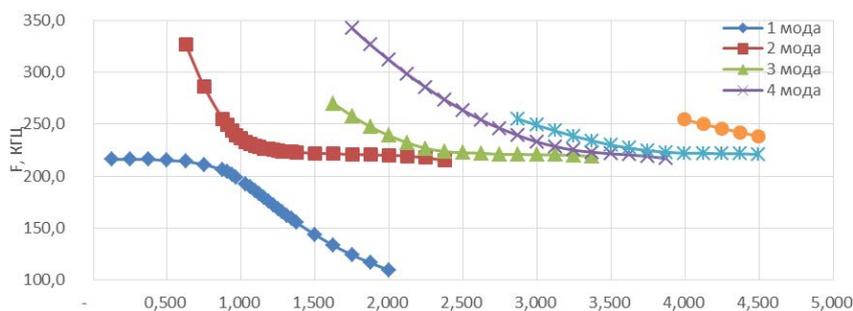


Рис. 4. Зависимость резонансных частот первых 6 мод в зависимости от отношения длины к высоте (поперечная поляризация).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

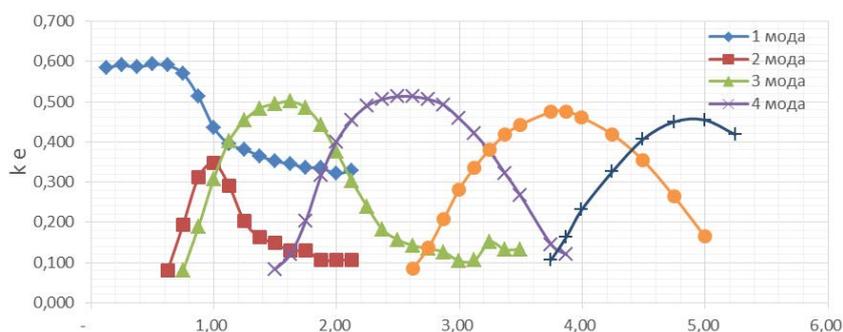


Рис. 5. Зависимость  $K_e$  от отношения длины к высоте (продольная поляризация).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

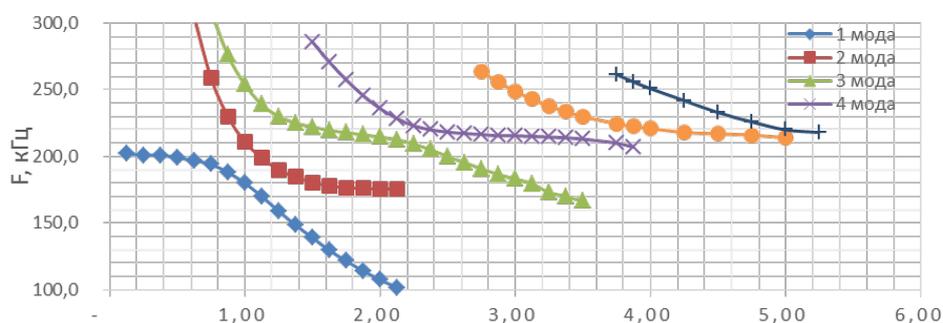


Рис. 6. Зависимость резонансных частот от отношения длины к высоте (продольная поляризация).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Как видно, при  $l/a$  менее 0,5 преобразователь достаточно хорошо соответствует классической модели полуволнового стержневого преобразователя. Для этого случая применение продольной поляризации более предпочтительно ( $K_e$  порядка 0,6). Для преобразователей с  $l/a$  более 0,5  $K_e$  и  $f$  существенно зависят от соотношения размеров. При чём эта зависимость для разных типов поляризации имеет разный характер. В частности, продольную поляризацию целесообразно использовать при соотношениях  $l/a$  порядка 1,5; 2,5; 3,8; 5. Применение поперечной поляризации имеет преимущества при  $l/a$  порядка 1; 2,5; 3; 4. При этом для корректного расчета рабочей частоты или использования преобразователя на нескольких частотах следует учитывать зависимость резонансной частоты от соотношения  $\frac{l}{a}$ , представленной на рис. 4, 6.

В табл. 1 и на рис. 7, 8 представлены экспериментально измеренные параметры преобразователей, изготовленных в соответствии с сформулированными рекомендациями.

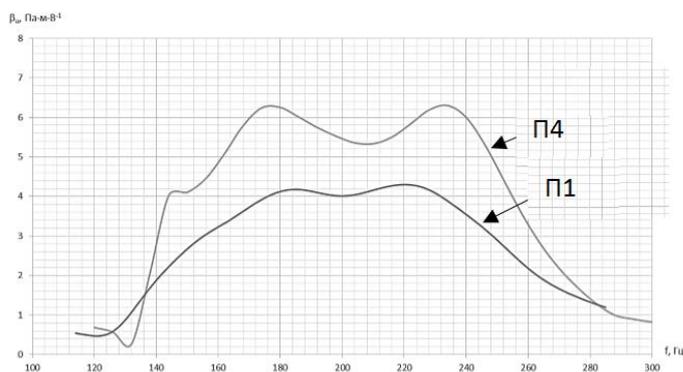


Рис. 7. АЧХ чувствительности в режиме излучения преобразователей П1 и П4.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

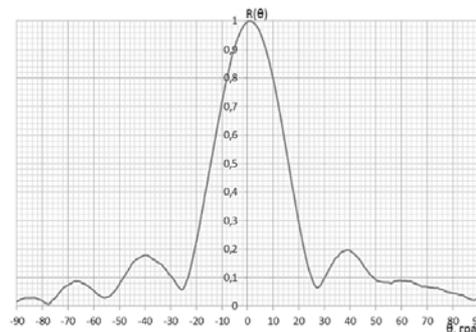


Рис. 8. Характеристика направленности преобразователя П4.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Таблица. 1

| Тип преобразователя                                                                                             | Чувствительность в режиме излучения Па/В*м | Ке   | φ, ° |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------|------|
| П1. Набор из трех стержневых продольных преобразователей ( $d_{33}$ )<br>$\frac{l}{a}=0,3$ ; $l=b$ ; $a=8$ мм   | 3,6                                        | 0,55 | 30   |
| П2. Набор из трех стержневых поперечных преобразователей ( $d_{31}$ )<br>$\frac{l}{a}=0,3$ ; $l=b$ ; $a=8,7$ мм | 4,8                                        | 0,31 | 30   |
| П3. Сплошной преобразователь ( $d_{33}$ ) $\frac{l}{a}=1,2$ ; $a=9,2$ мм; $b=3$ мм                              | 2,4                                        | 0,35 | 29   |
| П4. Сплошной преобразователь ( $d_{31}$ ) $\frac{l}{a}=1,2$ ; $a=8,8$ мм; $b=3$ мм                              | 6,3                                        | 0,48 | 29   |

Таким образом сформулированные рекомендации позволяют обеспечить высокую эффективность резонансных пластинчатых преобразователей в составе высокочастотных многоэлементных гидроакустических антенн.

**Литература**

1. Подводные электроакустические преобразователи. Расчет и проектирование / Под ред. В. В. Богородского. Л., Судостроение, 1983.
2. Галий С. Н., Доля В. К., Пантелеева О. В., Шмидт Э. Г. Новые решения построения высокочастотных антенных модулей для гидроакустических комплексов // Гидроакустика. 2016. № 28(4). С. 20–28.
3. Патент на полезную модель № 172092 U1 Российская Федерация, МПК H01Q 1/00. Высокочастотная многоэлементная гидроакустическая антенна: № 2017106496: заявл. 27.02.2017: опубл. 28.06.2017 / В. К. Доля, А. А. Горковец, С. Н. Галий; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг).
4. Галий С. Н., Доля В. К., Митько В. Н., Шмидт Э. Г. Влияние конструктивных элементов высокочастотной антенной решетки на параметры характеристики направленности. // Тр. XIV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ЛЕМА, 2018. С. 142–145.
5. Аронов Б. С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики. Л.: Энергоатомиздат, 1990, 272 с.

## АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРИЕМНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ПРОТОТИПОВ

А. С. Булычев

АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## ALGORITHM OF AUTOMATION OF DESIGNING OF HYDROACOUSTIC RECEIVING ANTENNAS BY MEANS OF DIGITAL PROTOTYPES

A. S. Bulychev

JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*В статье рассматривается алгоритм конструирования приемных гидроакустических антенн и метод его автоматизации с помощью формализованных цифровых прототипов. Показано, что данный метод позволяет в интерактивном режиме модифицировать конструкцию антенн в зависимости от задаваемых технических требований и автоматизировать корректировку конструкторской документации для изготовления деталей и сборочных единиц антенн.*

*In article the algorithm of designing of hydroacoustic receiving antennas and a method of its automation by means of the formalized digital prototypes is considered. It is shown that in an interactive mode this method allows to modify construction of antennas depending on the set technical requirements and to automate adjustment of design documentation for production of details and assembly units of antennas.*

Конструирование означает приведение в определенный порядок и взаимоотношения отдельных предметов с целью создания модели функционального изделия. В процесс создания модели сложных изделий, как приемные гидроакустические антенны, вовлечены множество участников узкой и обобщающей специализаций разрабатывающей организации и заказчика. На рис. 1 изображены алгоритмы идеального и реального процессов создания модели изделия.

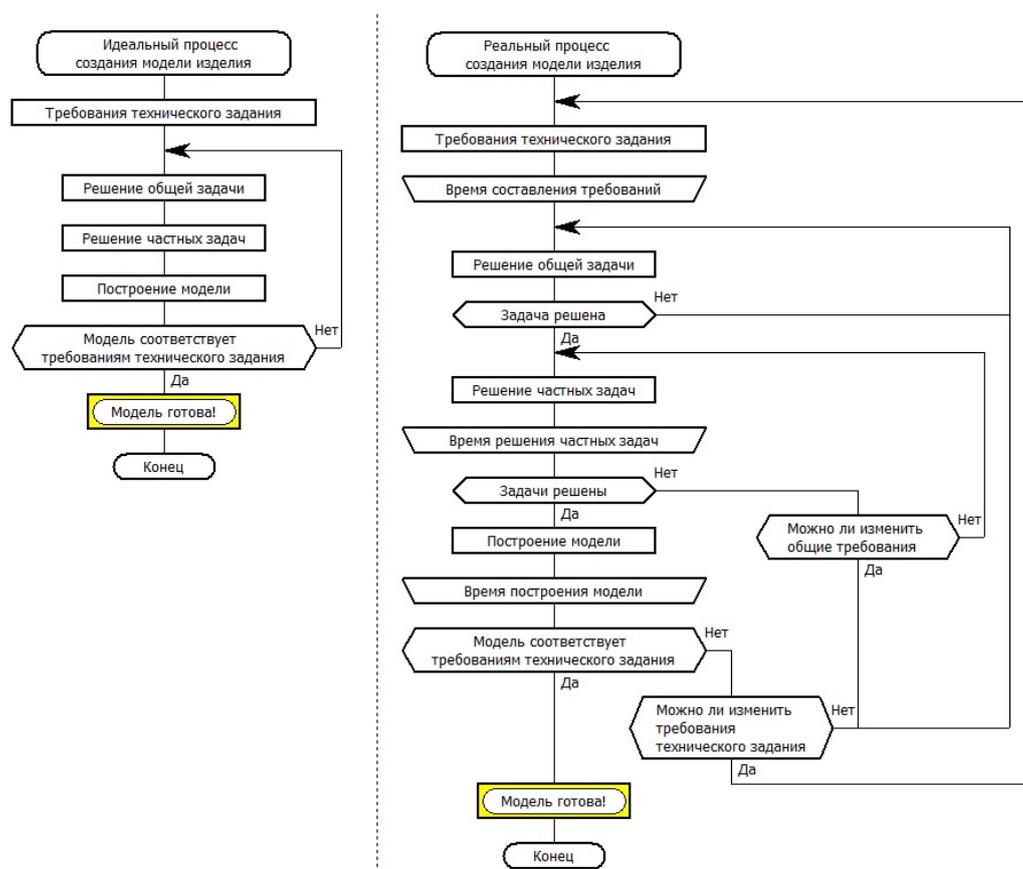


Рис. 1. Алгоритмы идеального и реальных процессов создания модели изделия.

Как видно из рис. 1 реальный процесс создания модели отличается от идеального тем, что решение общей и частных задач и составление требований технического задания являются итерационными с некоторым временем выполнения. В зависимости от сложности изделия, опыта, знаний и технической культуры разрабатывающего предприятия время выполнения отдельных операций может растягиваться от нескольких часов до нескольких дней, недель, месяцев и лет. При создании новых изделий очень важен срок выпуска продукции, поэтому возникает вопрос: «Каким образом можно сократить время решения задач конструирования в соответствии с требованиями технического задания?».

Для решения данного вопроса многие ученые и специалисты систематизируют и стандартизируют процесс рационального конструирования [1, 2], при этом задача конструирования раскладывается на элементарные подзадачи, известные варианты, решения которых содержатся в каталогах с описанием условий их применения и технических расчетов.

В связи с развитием современной вычислительной техники и методами проектирования следующим естественным шагом, по мнению автора, в развитии работ [1, 2] и аналогичных заключается в перенесении каталогов в цифровой вид. При этом появляется возможность сборки базовых прототипов различных изделий с функциями программирования основных параметров деталей, сборочных единиц, и их взаимоотношений, а также выбора подходящего прототипа для конкретного задания.

Цифровой вид прототипов открывает следующие, недоступные ранее, возможности – это интеграция с математическим аппаратом решения общей (комплексной) задачи конструирования изделий в единую систему автоматизированного проектирования, при которой модель конструкции перестраивается автоматизированным способом в зависимости от задаваемых технических характеристик изделия. Таким образом, применение цифровых прототипов, формализованных определенным образом, сокращает время построения модели изделия до реального времени.

Рассмотрим возможности эскизного конструирования приемных дискретных гидроакустических антенн цилиндрической формы с применением формализованных цифровых прототипов в зависимости от ширины угла основного лепестка диаграммы направленности и длины волны гидроакустического сигнала. Диаграмма направленности – это графическое представление коэффициента направленного действия антенны от направления антенны в заданной плоскости. Ширина основного лепестка определяет остроту направленного действия и влияет на такие технические характеристики изделия, как точность и разрешающая способность обнаружения.

На рис. 2 показаны основной лепесток диаграммы направленности (а) и базовый формализованный цифровой прототип дискретной приемной гидроакустической антенны цилиндрической формы.

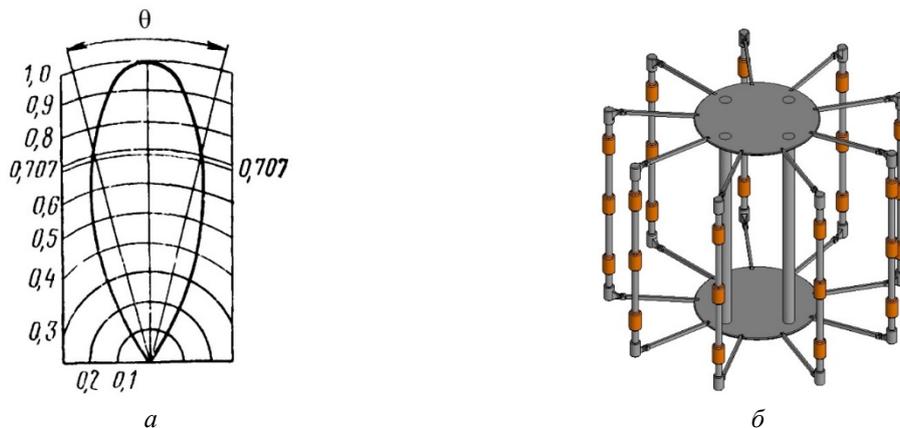


Рис. 2.

*а* — основной лепесток диаграммы направленности в полярных координатах;  
*б* — базовый цифровой прототип дискретной приемной гидроакустической антенны цилиндрической формы.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Цифровой прототип приемной гидроакустической антенны представляет собой параметризованную 3D-модель в виде набора дискретных приемников, располагаемых в форме цилиндра. Вертикальное расположение приемников формирует диаграмму направленности в вертикальной плоскости, радиальное расположение приемников — в горизонтальной плоскости. В соответствии с [3] острота направленного действия линейной дискретной антенны зависит от количества приемников и расстояния между ними (1), а антенны в форме окружности – от диаметра и количества приемников (2).

$$\theta_{0,7ver} = 2 \arcsin 0,44 \frac{\lambda}{N_{ver}d}, \quad (1)$$

где  $\theta_{0,7ver}$  — угол ширины основного лепестка диаграммы направленности линейной дискретной антенны;  $\lambda$  — длина волны гидроакустического сигнала;  $N_{ver}$  — количество приемников по вертикали;  $d$  — расстояние между приемниками

$$\theta_{0,7gor} = 2 \arcsin 0,35 \frac{\lambda}{D} \quad \text{при } N_{gor} \geq \pi \frac{D}{\lambda} + 2, \quad (2)$$

где  $\theta_{0,7gor}$  — угол ширины основного лепестка диаграммы направленности антенны в форме окружности;  $\lambda$  — длина волны гидроакустического сигнала;  $D$  — диаметр окружности расположения приемников;  $N_{gor}$  — количество приемников по окружности

Для параметризации цифрового прототипа выражения (1), (2) преобразуем в обратные уравнения

$$N_{ver} = \frac{0,88}{\sin\left(\frac{\theta_{0,7ver}\pi}{360}\right)} \quad \text{при } d = \frac{\lambda}{2}; \quad (3)$$

$$D = \frac{0,35\lambda}{\sin\left(\frac{\theta_{0,7gor}\pi}{360}\right)}, \quad (4)$$

где  $\theta_{0,7ver}$ ,  $\theta_{0,7gor}$  выражаются в градусах.

Подставив выражения (3), (4) в параметры цифрового прототипа мы можем в реальном времени перестраивать 3D-модель приемной гидроакустической антенны в реальном времени. Визуально и математически проверять принятые технические решения для выполнения требований технического задания. На рис. 3 показаны модификации эскизных моделей приемных гидроакустических антенн полученных автоматизированным способом из базового параметризованного цифрового прототипа в зависимости от длины волны гидроакустического сигнала и углов остроты направленности в горизонтальном и вертикальных направлениях. Алгоритм конструирования изделий с помощью цифровых прототипов представлен на рис. 4.

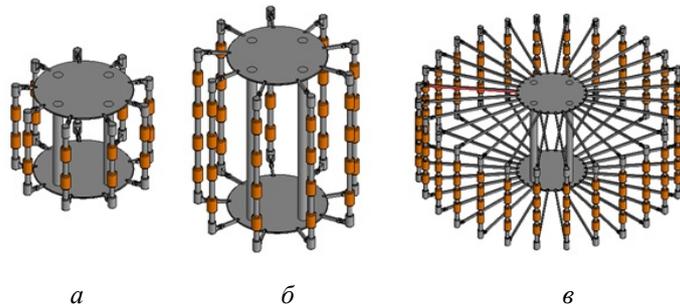


Рис. 3. Модификации моделей гидроакустических антенн с помощью базового цифрового прототипа при вводимых данных.

$a$  —  $\lambda = 0,207$  м,  $\theta_{0,7ver} = 60^\circ$ ,  $\theta_{0,7gor} = 20^\circ$ ;  $b$  —  $\lambda = 0,242$  м,  $\theta_{0,7ver} = 30^\circ$ ,  $\theta_{0,7gor} = 20^\circ$ ;  
 $v$  —  $\lambda = 0,145$  м,  $\theta_{0,7ver} = 30^\circ$ ,  $\theta_{0,7gor} = 5^\circ$ .

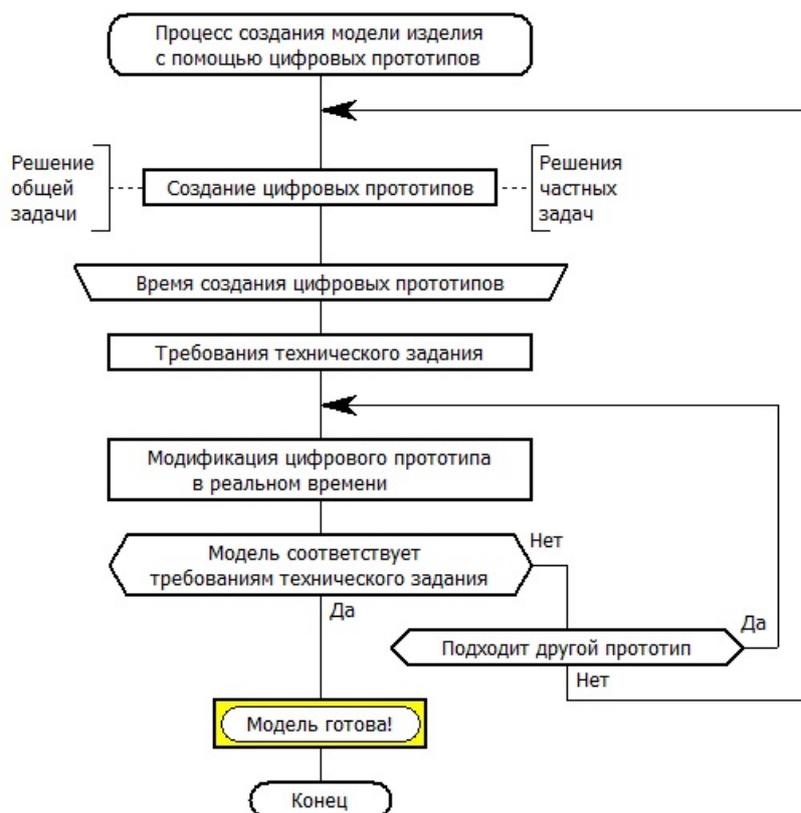


Рис. 4. Алгоритм процесса создания модели изделия с помощью цифровых прототипов.

Алгоритм конструирования изделий с помощью цифровых прототипов заключается в первоначальном создании базовых прототипов, в которых формализуется перечень необходимых параметризованных деталей и сборочных единиц в зависимости от функциональности изделия и условий эксплуатации. У каждого цифрового прототипа имеются свои ограничения, поэтому должны быть разработаны несколько вариантов прототипов, перекрывающие потенциальные технические требования заказчика.

Цифровые прототипы могут применяться на любой стадии разработки изделия от эскизного до рабочей конструкторской документации. Цифровые прототипы естественно встраиваются в систему автоматизированного сквозного проектирования с электронным архивом конструкторской документации, поэтому наибольшую экономическую ценность представляют собой именно полностью законченные цифровые прототипы, с помощью которых можно не только создавать модель изделия, но узнать сроки и стоимость его изготовления. При согласовании с заказчиком всех параметров изделия — нажатием одной кнопки запускается изготовление требуемого изделия. Процесс создания и сущность цифрового прототипа будут рассмотрены в следующих работах автора.

#### *Литература*

1. Амиров Ю. Д. Основы конструирования: Творчество – стандартизация – экономика // Справочное пособие. М.: Изд-во стандартов, 1991.
2. Рот К. Конструирование с помощью каталогов. М.: Машиностроение, 1995.
3. Евтютов А. П., Митько В. Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВИАЦИОННОЙ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ САМОЛЕТА ATL2 НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА К ЗАВЯЗКЕ ТРАССЫ ЦЕЛИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ С НОВЫМ ПОКОЛЕНИЕМ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ БУЕВ

*С. А. Бакуменко, Г. К. Михайлов, канд. техн. наук*

НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА», Санкт-Петербург, Россия

## ESTIMATION THE EFFECTIVENESS OF THE SONOBUOY SYSTEM FOR THE ATL2 AIRCRAFT BASED ON A PROBABILISTIC APPROACH TO TRACK-INITIATION OF THE TARGET IN DIFFERENT MODES USING A NEW GENERATION OF SONOBUOYS

*S. A. Bakumenko, G. K. Mikhailov, Ph.D.*

Research Institute of Shipbuilding and Armament of Navy «Naval Academy», St. Petersburg, Russia

*В докладе приведены результаты оценки эффективности радиогидроакустической системы (РГС) поиска ПЛ самолёта ATL2 на основе вероятностного подхода к завязке трассы цели с использованием нового поколения радиогидроакустических буев.*

*The report presents the results of estimation the effectiveness of the sonobuoy system for the ATL2 aircraft based on a probabilistic approach to track-initiation of the target using a new generation of sonobuoys.*

Настоящие исследования выполнены в продолжение статьи, в которой приведена оценка эффективности авиационной радиогидроакустической системы (РГС) самолета ATL2 с бортовой аппаратурой (БА) STAN, при решении задачи поиска с новым поколением радиогидроакустических буев (РГБ) «SonoFlash» [1]. В отличие от предыдущих исследований оценена эффективность РГС на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ при наиболее часто используемом за рубежом правиле «3 из 5» последовательных циклов обнаружения в активных моностатическом, бистатическом и мультистатическом режимах работы РГС [2].

На рис. 1 приведена зависимость вероятности завязки трассы ПЛ авиационной РГС при правиле «3 из 5» от вероятности обнаружения за один цикл обзора. Таким образом, мы допускаем вероятность трех или больше обнаружений в пяти последовательных циклах обзора. Если все пять циклов обнаружения выполнены в одних, и тех же условиях и они статистически независимы, тогда вероятность завязки трассы  $p_{zm}$  в окончательном виде равна [2, 3]:

$$p_{zm} = p_{об}^3 (10 - 15p_{об} + 6p_{об}^2),$$

где  $p_{об}$  — вероятность обнаружения ПЛ в одном цикле обзора.

Как следует из рис. 1,  $p_{zm}$  меньше, когда  $p_{об} < 0,5$  и больше, когда  $p_{об} > 0,5$ . При  $p_{об} = 0,75$  вероятность завязки трассы РГС составит  $p_{zm} = 0,9$ , т.е. пороговое отношение сигнал/помеха для завязки трассы цели составляет 16 дБ, что меньше чем при обнаружении за 1 цикл обзора — 20 дБ.

Исходные данные по характеристикам РГБ «SonoFlash» и БА STAN РГС на каждом рабочем месте оператора-акустика приведены в [1]. Для указанных исходных данных энергетическая дальность обнаружения РГС с РГБ «SonoFlash» подводной цели со средним эквивалентным радиусом цели 10 м в моностатическом режиме работы составит не менее 10 км [1], при этом энергетическая дальность завязки трассы РГС составит не менее 12 км.

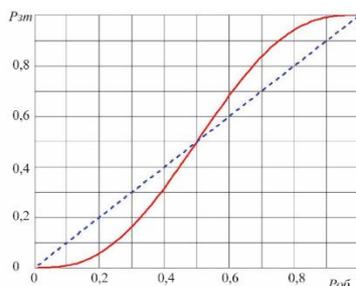


Рис. 1. Зависимость вероятности завязки трассы РЛС авиационной РГС при правиле «3 из 5» от вероятности обнаружения ПЛ за один цикл обзора.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

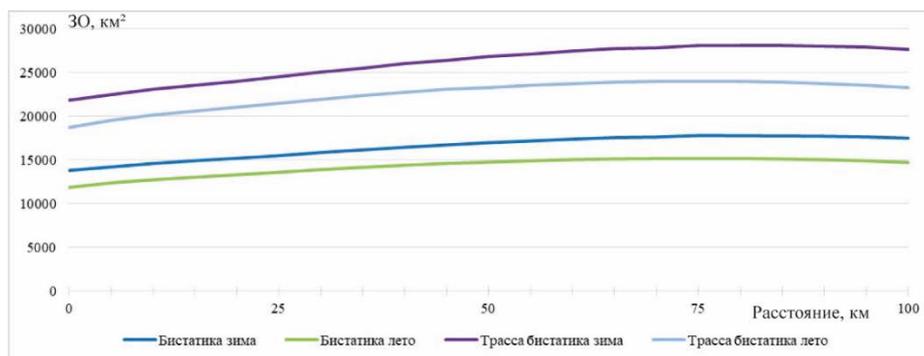


Рис. 2. Зависимости ЗО в моностатическом и бистатическом режимах работы РГС зимой и летом от интервала постановки РГБ «Sono-Flash» на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ и без него.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Показателем эффективности РГС самолёта ATL2 являются оценки зон обнаружения (ЗО) на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ в условиях Чёрного моря зимой и летом, выполненные по методике расчёта гидроакустических систем с использованием лучевой акустической модели звукового поля [4, 5] при следующих исходных данных: глубина антенн буев  $H_b=300$  м, глубина нахождения пл  $H_{пл}=200$  м (соответствует благоприятным гидрологическим условиям, при которых нет гидрологических ограничений по дальности обнаружения).

**Исследование моностатического и бистатического режима работы РГС самолёта ATL2 на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ.** На рис. 2 представлены зависимости ЗО в моностатическом и бистатическом режимах работы РГС на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ и без него (двух разнесенных буев: один «SonoFlash» в активно-пассивном режиме, другой «SonoFlash» в пассивном режиме) от интервалов постановки РГБ «SonoFlash» в бистатическом режиме работы.

Как видно из рис. 2 ЗО РГС зимой превосходят ЗО РГС летом, что обусловлено влиянием гидрологических условий: большой рост ЗО за пределами второй кольцевой мёртвой зоны (МЗ). Зона обнаружения в моностатическом режиме составляет:  $1,4 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> и  $1,2 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> зимой и летом, соответственно. При этом ЗО с завязкой трассы ПЛ составляет  $2,2 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> и  $1,9 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> зимой и летом, соответственно. Рост площади ЗО при оптимальном интервале постановки РГБ в бистатическом режиме составит  $1 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> и  $9 \cdot 10^3$  км<sup>2</sup> зимой и летом, соответственно.

**Исследование мультистатического режима работы РГС самолёта ATL2 на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ.** На рис. 3 представлены зависимости ЗО в моностатическом и мультистатическом режимах работы РГС (один «SonoFlash» в активно-пассивном режиме в центре и четыре крестообразно разнесенные буи «SonoFlash» в пассивном режиме) на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ и без него от интервалов постановки РГБ «SonoFlash» в мультистатическом режиме работы РГС.

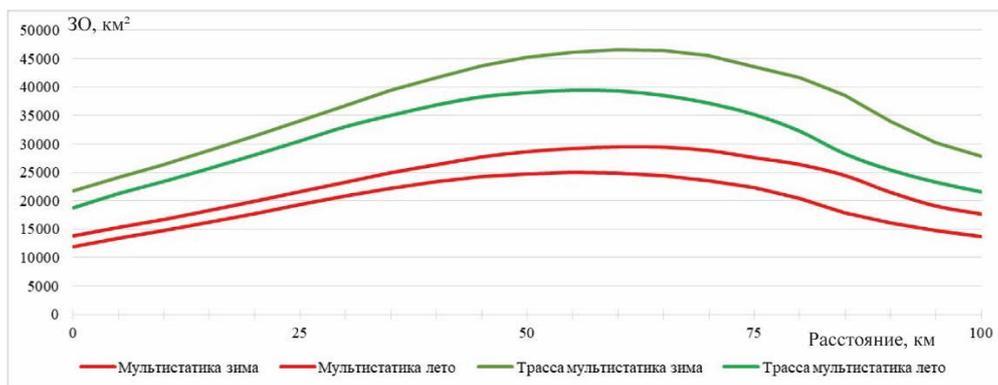


Рис. 3. Зависимости ЗО в моностатическом и мультистатическом режимах работы РГС зимой и летом от интервала постановки РГБ «Sono-Flash» на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ и без него.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Как видно из рис. 3 рост ЗО РГС самолёта ATL2 в мультистатическом режиме более значителен, чем в бистатическом режиме, несмотря на рост площади МЗ. При оптимальном интервале постановки РГБ 60 км и 55 км (зимой и летом, соответственно) площади ЗО составляют  $2,9 \cdot 10^4$  и  $2,5 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup>, соответственно. Площади ЗО по сравнению с бистатическим режимом увеличились на ~ 30 %.

Зона обнаружения на основе вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ составит  $7,4 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> и  $6,2 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> зимой и летом, соответственно. Рост ЗО в мультистатическом режиме работы при оптимальном интервале постановки РГБ зимой и летом составит  $4,5 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup> и  $3,7 \cdot 10^4$  км<sup>2</sup>, соответственно.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод о эффективности использования в РГС вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ, который обеспечивает существенный рост ЗО ПЛ в бистатическом и мультистатическом режимах работы. При этом использование РГС в мультистатическом режиме поиска ПЛ, несмотря на естественную сложность реализации с точки зрения загрузки операторов и постановки РГБ, наиболее целесообразно.

**Выводы.** В настоящей статье приведены предварительные оценки зон обнаружения ПЛ авиационной РГС самолета ATL 2 с БА STAN в зависимости от интервалов постановки РГБ «SonoFlash» в активном моностатическом, бистатическом и мультистатическом режимах работы. Приведённые результаты позволяют подтвердить эффективность использования в авиационной РГС вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ.

Полученные данные могут быть использованы в качестве обоснования необходимости использования вероятностного подхода к завязке трассы ПЛ в РГС авиационных комплексов морской авиации ВМФ, а также для оценки потенциальных возможностей авиационной РГС самолёта ATL2.

### Литература

1. Бакуменко С. А., Михайлов Г. К. Оценка эффективности авиационной радиогидроакустической системы самолета ATL2 при решении задач поиска с использованием мультистатического режима с новым поколением радиогидроакустических буев // Тр. Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Политех-Пресс, 2020. С. 172–175.
2. Кузьмин С. З. Цифровая обработка радиолокационной информации. М.: Сов. радио, 1968.
3. Fewell M. P., Ozols S. Simple Detection-Performance Analysis of Multistatic Sonar for Anti-Submarine Warfare, technical note DSTO-TR-2562 of the the Defence Science and Technology Organisation. 2011.
4. Козловский С. В., Сергеев В. А. Методика оценки информационной эффективности мультистатических систем гидролокации // Экология и развитие общества. 2016. № 3.
5. Методика расчета зон обнаружения корабельных мультистатических ГАС. Пушкин: НИЦ РЭВ и ФИР НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2017.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

*И. И. Дементьев*, канд. техн. наук, *В. А. Шабанов*, *Н. С. Шабанова*  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## METHOD OF CALCULATION OF SENSITIVITY OF FILM PIEZOELECTRIC TRANSDUCER OF THE SONAR ANTENNA

*I. I. Dementiev*, Ph.D., *V. A. Shabanov*, *N. S. Shabanova*  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Для оптимизации технических характеристик гидроакустических антенн рассматривается возможность перехода к пьезоэлектрическим преобразователям на основе пленочных материалов. Разработка методики расчета характеристик нелинейных непрерывных гидроакустических антенн является актуальной научной задачей. В статье представлена методика расчета чувствительности пленочного пьезопреобразователя, основанная на прогнозировании механических напряжений в его конструкции.*

*For optimization of sonar antenna performance the possibility of conversion to piezoelectric transducers based on film materials is considered. Development of a method of calculation of nonlinear continuous sonar antennas characteristics is an actual scientific task. In the article the calculation method of the film piezoelectric transducer sensitivity based on prediction of mechanical stress in its structure is provided.*

Оптимизация технических характеристик гидроакустических антенн с целью их совершенствования продолжает оставаться актуальной научной задачей.

В настоящее время в Концерне «Океанприбор» выполняются работы по исследованию целесообразности использования в конструкциях антенн пленочных пьезоэлектрических преобразователей, что, например, обеспечит улучшение массогабаритных характеристик конформных и покровных антенн больших площадей, позволит повысить помехоустойчивость приемных антенн. В свою очередь, возрастет эффективность функционирования антенн в различных режимах, например, в режиме шумопеленгования.

Конструктивные изменения, заключающиеся во внедрении в антенны пленочных пьезопреобразователей, привели к переосмыслению процесса проектирования антенн в целом, что связано с новым витком в гидроакустической технике, а именно с проблемой проектирования нелинейных непрерывных антенн.

Анализ научно-технической литературы [1–4] показал, что разработка методики расчета электроакустических характеристик пленочных гидроакустических антенн является актуальной научной задачей.

В статье представлена математическая модель напряженно-деформированного состояния тонкостенной прямоугольной поверхности антенны в виде пленочного пьезоэлектрического элемента, как деформируемого твердого тела. Математическая модель предназначена для прогнозирования тензора механических напряжений, возникающих в объекте моделирования при воздействии звукового давления принимаемого сигнала с учетом изменения температуры пленочного элемента в реальных условиях применения в морской воде. Компоненты тензора механических напряжений используются для расчета чувствительности пьезоэлемента.

При разработке математической модели предполагалось, что объект моделирования наделен свойствами идеально упругого тела [5] и обладает признаками ортогональной анизотропии физико-механических свойств [6]. В математической модели учтены изменения геометрических конфигураций поперечных сечений пьезоэлемента при деформациях поперечных сдвигов, что позволило отступить от допущений, базирующихся на гипотезах Кирхгофа [7]. Разработанная математическая модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & A \cdot \left( 2 \cdot h \cdot \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot dz + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot dz \right] \right) + \\
 & + B \cdot \left( 2 \cdot h \cdot \frac{\partial^2 v_0}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y \partial x} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot dz + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot dz \right] \right) + \\
 & + C \cdot \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_5 + \int_{-h}^h f_5 \cdot dz \right] + \frac{\partial T_3}{\partial x} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_6 + \int_{-h}^h f_6 \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + h \cdot \left[ \frac{\partial \theta_2}{\partial x} + \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right] \right) + \\
 & + G_{xy} \cdot \left( 2 \cdot h \cdot \left[ \frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot dz + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x \partial y} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot dz + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot dz \right] \right) = \\
 & = - \sum_{i=1}^k q_i^x + \rho \cdot \left( 2 \cdot h \cdot \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial t^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot dz + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot dz \right] \right); \\
 \\
 & G_{xy} \cdot \left( 2 \cdot h \cdot \left[ \frac{\partial^2 u_0}{\partial y \partial x} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y \partial x} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot dz + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot dz + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot dz \right] \right) + \\
 & + D \cdot \left( 2 \cdot h \cdot \frac{\partial^2 u_0}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x \partial y} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot dz + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot dz \right] \right) + \\
 & + H \cdot \left( 2 \cdot h \cdot \frac{\partial^2 v_0}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot dz + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot dz \right] \right) + \\
 & + K \cdot \left( \frac{\partial T_2}{\partial y} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_5 + \int_{-h}^h f_5 \cdot dz \right] + \frac{\partial T_3}{\partial y} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_6 + \int_{-h}^h f_6 \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + h \cdot \left[ \frac{\partial \theta_2}{\partial y} + \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \right] \right) = \\
 & = - \sum_{i=1}^k q_i^y + \rho \cdot \left( 2 \cdot h \cdot \frac{\partial^2 v_0}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial t^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot dz + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot dz \right] \right); \\
 & \quad G_{xz} \cdot \frac{\partial \Psi_2}{\partial x} \cdot \left( \int_{-h}^h F_2 \cdot dz - 2 \cdot h \cdot M_1 + M_2 \cdot \int_{-h}^h F_1 \cdot dz \right) + \\
 & + G_{yz} \cdot \frac{\partial \Phi_2}{\partial y} \cdot \left( \int_{-h}^h F_4 \cdot dz - 2 \cdot h \cdot M_3 + M_4 \cdot \int_{-h}^h F_3 \cdot dz \right) = - \sum_{j=1}^m q_j^n + 2 \cdot h \cdot \rho \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2};
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 & A \cdot \left( -\frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_1 + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot z \cdot dz \right] \right) + \\
 & \quad + B \cdot \left( -\frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial y^2 \partial x} + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y \partial x} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_3 + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot z \cdot dz \right] \right) + \\
 & \quad + C \cdot \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_7 + \int_{-h}^h f_5 \cdot z \cdot dz \right] + \frac{\partial T_3}{\partial x} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_8 + \int_{-h}^h f_6 \cdot z \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_9 \cdot \left[ \frac{\partial \theta_2}{\partial x} - \frac{\partial \theta_1}{\partial x} \right] \right) + \\
 & \quad + G_{xy} \cdot \left( -\frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x \partial y} \right] + \right. \\
 & \quad + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_1 + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot z \cdot dz \right] + \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x \partial y} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_3 + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot z \cdot dz \right] \right) - \\
 & \quad - G_{xz} \cdot \Psi_2 \cdot \left[ \int_{-h}^h F_2 \cdot dz - 2 \cdot h \cdot M_1 + M_2 \cdot \int_{-h}^h F_1 \cdot dz \right] = -\sum_{p=1}^b m_p^x + \\
 & \quad + \rho \cdot \left( -\frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial t^2} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial t^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_1 + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot z \cdot dz \right] \right); \\
 & \quad + D \cdot \left( -\frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot \left[ \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y \partial x} + \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right] + \right. \\
 & \quad + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial y \partial x} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_1 + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot z \cdot dz \right] + \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial x^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_3 + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot z \cdot dz \right] \right) + \\
 & \quad + E \cdot \left( -\frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^2 \Psi_2}{\partial x \partial y} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_2 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_1 + M_2 \cdot \int_{-h}^h f_1 \cdot z \cdot dz \right] \right) + \\
 & \quad + F \cdot \left( -\frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial y^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_3 + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot z \cdot dz \right] \right) + \\
 & \quad + G \cdot \left( \frac{\partial T_2}{\partial y} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_7 + \int_{-h}^h f_5 \cdot z \cdot dz \right] + \frac{\partial T_3}{\partial y} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_8 + \int_{-h}^h f_6 \cdot z \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_9 \cdot \left[ \frac{\partial \theta_2}{\partial y} - \frac{\partial \theta_1}{\partial y} \right] \right) - \\
 & \quad - G_{yz} \cdot \Phi_2 \cdot \left( \int_{-h}^h F_4 \cdot dz - 2 \cdot h \cdot M_3 + M_4 \cdot \int_{-h}^h F_3 \cdot dz \right) = -\sum_{p=1}^b m_p^y + \\
 & \quad + \rho \cdot \left( -\frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial t^2} + \frac{\partial^2 \Phi_2}{\partial t^2} \cdot \left[ \int_{-h}^h f_4 \cdot z \cdot dz - \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_3 + M_4 \cdot \int_{-h}^h f_3 \cdot z \cdot dz \right] \right);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \lambda_x \cdot \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_5 + \int_{-h}^h f_5 \cdot dz \right] + \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_6 + \int_{-h}^h f_6 \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + h \cdot \left[ \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} \right] \right) + \\
 & + \lambda_y \cdot \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_5 + \int_{-h}^h f_5 \cdot dz \right] + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_6 + \int_{-h}^h f_6 \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + h \cdot \left[ \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y^2} \right] \right) + \\
 & + \lambda_z \cdot \left( T_2 \cdot \int_{-h}^h \Omega_1 \cdot dz + T_3 \cdot \int_{-h}^h \Omega_2 \cdot dz \right) = \\
 & = c \cdot \rho \cdot \left( \frac{\partial T_2}{\partial t} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_5 + \int_{-h}^h f_5 \cdot dz \right] + \frac{\partial T_3}{\partial t} \cdot \left[ 2 \cdot h \cdot M_6 + \int_{-h}^h f_6 \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + h \cdot \left[ \frac{\partial \theta_2}{\partial t} + \frac{\partial \theta_1}{\partial t} \right] \right); \\
 \\
 & \lambda_x \cdot \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_7 + \int_{-h}^h f_5 \cdot z \cdot dz \right] + \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_8 + \int_{-h}^h f_6 \cdot z \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_9 \cdot \left[ \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} \right] \right) + \\
 & + \lambda_y \cdot \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_7 + \int_{-h}^h f_5 \cdot z \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_8 + \int_{-h}^h f_6 \cdot z \cdot dz \right] + \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_9 \cdot \left[ \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y^2} \right] \right) + \\
 & + \lambda_z \cdot \left( T_2 \cdot \int_{-h}^h \Omega_1 \cdot z \cdot dz + T_3 \cdot \int_{-h}^h \Omega_2 \cdot z \cdot dz \right) = \\
 & = c \cdot \rho \cdot \left( \frac{\partial T_2}{\partial t} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_7 + \int_{-h}^h f_5 \cdot z \cdot dz \right] + \frac{\partial T_3}{\partial t} \cdot \left[ \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_8 + \int_{-h}^h f_6 \cdot z \cdot dz \right] + \right. \\
 & \quad \left. + \frac{2 \cdot h^3}{3} \cdot M_9 \cdot \left[ \frac{\partial \theta_2}{\partial t} - \frac{\partial \theta_1}{\partial t} \right] \right),
 \end{aligned}$$

где  $x, y, z$  — декартовы координаты;  $h$  — линейный размер, соответствующий половине толщины пьезоэлемента;  $u_0, v_0, w$  — перемещения элементарных объемов срединной поверхности;  $f_i$  ( $i = 1 \dots 6$ ) — функции, определяющие нелинейность распределений по толщине температуры и тангенциальных перемещений элементарных объемов;  $\theta_2, \theta_1$  — температуры лицевых поверхностей;  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  — коэффициенты теплопроводности;  $\rho$  — плотность;  $c$  — удельная теплоемкость;  $F_i = \frac{df_i}{dz}$  ( $i = 1 \dots 6$ );  $\Omega_1 = \frac{dF_5}{dz}$ ;  $\Omega_2 = \frac{dF_6}{dz}$ ;  $G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$  — модули сдвигов;

$q_i^x, q_i^y, q_j^n, m_p^x, m_p^y$  — касательные, нормальная и моментные механические воздействия на лицевые поверхности;  $k, m, b$  — количества воздействий  $q_i^x, q_i^y, q_j^n, m_p^x$  и  $m_p^y$ ;  $t$  — математическое время;  $A, B, C, D, H, K, M_i$  ( $i = 1 \dots 9$ ) — коэффициенты с константами состояния пьезоэлемента.

Для подтверждения достоверности математической модели (1) проведен сравнительный анализ результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований [8] продольного напряжения на примере стержневой конструкции из эпоксидноволокнистого углепластика,

армированного волокнами под углами  $\pm 45^\circ$ , подверженной одновременным воздействиям температурной и механической растягивающей нагрузок. Результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований продольного напряжения на примере стержневой композитной конструкции

| Порядковый номер образца | Величины температурной и механической нагрузок |                  | Теоретическое значение продольного напряжения | Экспериментальное значение продольного напряжения |
|--------------------------|------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                          | $T, K$                                         | $q, Pa$          | $\sigma_x, Pa$                                | $\sigma_x, Pa$                                    |
| 1                        | 293,15                                         | $1,4 \cdot 10^8$ | $118,06 \cdot 10^6$                           | $112,78 \cdot 10^6$                               |
| 2                        | 293,15                                         | $9,8 \cdot 10^8$ | $121,29 \cdot 10^6$                           | $115,72 \cdot 10^6$                               |
| 3                        | 373,15                                         | $1,4 \cdot 10^8$ | $97,64 \cdot 10^6$                            | $93,16 \cdot 10^6$                                |
| 4                        | 373,15                                         | $9,8 \cdot 10^8$ | $98,47 \cdot 10^6$                            | $94,14 \cdot 10^6$                                |
| 5                        | 398,15                                         | $1,4 \cdot 10^8$ | $86,15 \cdot 10^6$                            | $82,38 \cdot 10^6$                                |
| 6                        | 398,15                                         | $9,8 \cdot 10^8$ | $85,47 \cdot 10^6$                            | $82,38 \cdot 10^6$                                |
| 7                        | 423,15                                         | $1,4 \cdot 10^8$ | $73,69 \cdot 10^6$                            | $70,61 \cdot 10^6$                                |
| 8                        | 423,15                                         | $9,8 \cdot 10^8$ | $75,11 \cdot 10^6$                            | $73,55 \cdot 10^6$                                |

Сравнительный анализ результатов, представленных в табл. 1, показал сходимость теоретических и экспериментальных значений продольного напряжения в пределах 5 %, что является подтверждением достоверности математической модели (1).

На основе известного тензора механических напряжений, определенного с использованием математической модели (1), предложено прогнозировать эффективный пьезоэлектрический модуль [1], для чего нами разработана формула

$$d_{ef} = (d_{31} \cdot \sigma_x + d_{32} \cdot \sigma_y + d_{33} \cdot \sigma_z) \cdot \frac{q_n \cdot (q_x + q_y) + q_x \cdot q_y}{q_x \cdot q_y \cdot q_n}, \quad (2)$$

где  $d_{31}, d_{32}, d_{33}$  — пьезоэлектрические модули;  $q_x, q_y, q_n$  — результирующие значения нагрузок, которые определяются по следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} q_x &= \sum_{i=1}^n q_i^x = \sum_{i=1}^n ([\tau_{zx}(h)]_i - [\tau_{zx}(-h)]_i); \\ q_y &= \sum_{j=1}^m q_j^y = \sum_{j=1}^m ([\tau_{zy}(h)]_j - [\tau_{zy}(-h)]_j); \\ q_n &= \sum_{k=1}^c q_k^n = \sum_{k=1}^c ([\sigma_z(h)]_k - [\sigma_z(-h)]_k). \end{aligned} \quad (3)$$

Для оценки чувствительности пленочного пьезоэлектрического элемента предложено использовать формулу

$$\gamma = \frac{2 \cdot h \cdot d_{ef}}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}, \quad (4)$$

где  $2 \cdot h$  — толщина пьезоэлемента;  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная.

Представленный в статье математический аппарат предполагается использовать в Концерне «Океанприбор» для прогнозирования чувствительности пленочных электроакустических преобразователей разных конструкций на основе поливинилиденфторида Ф-2МЭ. Полученные результаты расчетов будут использованы для определения рационального облика образцов преобразователей с целью их изготовления для дальнейших экспериментальных исследований характеристик этих образцов.

В перспективе предложенный математический аппарат будет доработан с учетом уравнений состояния пьезоактивного материала [2], что позволит расширить область его применения, в частности, использовать в расчетах резонансных частот и коэффициента электромеханической связи для элементов пленочных гидроакустических антенн.

### *Литература*

1. Moffett M. B., Ricketts D., Butler J. L. The effect of electrode stiffness on the piezoelectric and elastic constants of a piezoelectric bar // Acoustical Society of America. 1988. № 83(2). P. 805–811.
2. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика // Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1990.
3. Исследование диэлектрических свойств пленок полимерных композитов с сегнетоэлектрическим наполнителем мостовым методом и методом тепловых шумов / Под ред. И. В. Платонова и др. // ВМУ. Физика. Астрономия. 2011. Серия 3. № 2. С. 63–66.
4. Waite A. D. Sonar for Practising Engineers // Third Edition. LTD John Wiley & Sons, 2002.
5. Дудяк А. И., Сахнович Т. А. Прикладная теория упругости: учеб. пособие. Минск: Изд-во Гревцова, 2010.
6. Композиционные материалы: справочник / Под ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990.
7. Григолюк Э. И., Селезов И. Т. Механика твердых деформируемых тел. Неклассические теории колебаний стержней, пластин и оболочек. М.: ВИНТИ, 1973. Т. 5.
8. Разрушение композитов с учетом воздействия температуры и влаги / Под ред. И. М. Махмутов, Т. Г. Сорина, Ю. В. Суворова, А. И. Сургучева // Механика композитных материалов. 1983. № 2. С. 581–591.

# ПРОБЛЕМЫ ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОФИЗИКИ

## АКУСТИКА И ГИДРОДИНАМИКА ИМПАКТА КАПЛИ

Ю. Д. Чашечкин, д-р физ.-мат. наук

ФГБУН Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

## ACOUSTICS AND HYDRODYNAMICS OF THE DROP IMPACT

Yu. D. Chashechkin, Dr.Sc.

A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, RAS, Moscow, Russia

*Приводятся результаты экспериментальных исследований звуковых пакетов в воде и в воздухе, возникающих в результате растекания свободно падающей капли в покоящейся жидкости. Изучается картина течений и структура звуковых пакетов в режимах интрузивного и ударного растекания капли. Прослежена связь структуры течений и капиллярных волн с процессами отрыва газовых пузырьков, излучающих звук. Анализируется падение одиночных и множественных капель, моделирующих шум дождя.*

*The results of experimental studies of sound packets in water and in air resulting from a freely falling drop impact in a fluid at rest are presented. The pattern of flows and the structure of sound packets in the modes of intrusive and shock droplet spreading were studied. The relationship between the structure of flows and capillary waves and the separation of sound-emitting gas bubbles is traced. The fall of single and multiple drops simulating the noise of rain is analyzed.*

Импакт упавшей капли — последовательность атомно-молекулярных, гидродинамических и акустических процессов в принимающей жидкости — активно изучается экспериментально, теоретически, а в последние годы — и численно. Интерес обусловлен фундаментальностью темы и широким кругом приложений во многих отраслях промышленности — химической, биохимической, металлургической, в энергетике — в традиционных двигателях внутреннего сгорания и реактивных, а также в медицине. Акустика и художественные образы капельных течений служат источником вдохновения для музыкантов, поэтов, скульпторов и ювелиров с античных времен. Систематические исследования гидродинамики импакта капли начались в конце XIX в., звук импакта капли вначале был зарегистрирован в воздухе, а с изобретением гидрофонов — и в толще жидкости только в тридцатые годы прошлого века.

Создание интерфейсов — устройств синхронизации сигналов разнородной природы, позволило одновременно регистрировать звуковые пакеты капель в воде, в воздухе и оптическими методами идентифицировать основной источник звука — резонансно осциллирующий газовый пузырек. Механизм возбуждения колебаний газового пузырька — удар быстро втягивающегося остатка разрывающегося воздушного канала, который связывал газовый фрагмент с основным объемом, прослежен методом скоростной видеорегистрации.

Интерес к совместному изучению гидродинамики и акустики всплеска вызван рядом научных и прикладных задач. С середины XX в. внимание уделяется исследованиям распространения звука в атмосфере и гидросфере, определению антропогенных источников его происхождения на фоне естественного шума различной природы (ветрового волнения, атмосферных осадков, сейсмической активности, морских организмов). В эмпирическом спектре естественного морского шума в диапазоне 0,5–25 кГц выделен уединенный спектральный пик на частоте  $f \approx 15$  кГц, обусловленный интенсивным дождем [1]. Замеченные закономерности используются для решения метеорологических задач, в частности, для оценки интенсивности осадков в удаленных акваториях. Идентификация резонирующих газовых пузырьков в качестве

одного из источников подводного шума дождя активизировала лабораторные исследования гидроакустики одиночных капель и их групп.

Типичные синхронно регистрируемые фонограммы гидрофона, микрофона и лазерного детектора смещения поверхности, вызванные импактом падающей в воду одиночной капли, приведены на рис. 1. В сигнале гидрофона (кривая *I*) выражен ударный импульс *I*, последующий спад, вызванный углублением каверны и подъем с возвышением венца. После паузы наблюдается группа гидродинамических возмущений давления, в конце которой регистрируется звуковой пакет *II*.

Основному пакету *II* предшествует слабый сигнал (рис. 1, *a*, вставка 2), с частотой  $f = 72$  кГц, соответствующей резонансному диаметру пузырька  $d_b = 0,09$  мм. Излучаемый резонансный пакет *II* регистрируется и в воде, и в воздухе. Частоты сигналов гидрофона и микрофона совпадают (рис.1, вставки 1 и 3,  $f = 3,8$  кГц). Синхронизации фонограмм (рис. 1, *a*, *b*) свидетельствует о единстве источника звука. Задержка между сигналами гидрофона (вставка 1) и микрофона (вставка 3) составляет 300 мкс, что согласуется с оценкой времени распространения звука  $t_a = L_a / c_a$ , ( $L_a = a / \cos \varphi = 10,3$  см — расстояние от точки удара капли до микрофона,  $c_a = 340$  м/с — скорость звука в воздухе). При частотах порядка единиц килогерц подводные звуковые пакеты практически стопроцентно проникают через поверхность. Высокие частоты (свыше 10 кГц) не всегда регистрируются микрофоном, хотя и попадают в его частотный диапазон.

Вслед за акустическими пакетами с задержкой в 5 мс появляется короткий (4 мс) сигнал на выходе лазерного детектора (рис. 1, *в*, вставка 4). В условиях опыта падение капли одновременно с ударным импульсом *I* (рис. 1) вызывает резкое отклонение лазерного луча за пределы фотоприемника. Однако практически одновременно со звуковым пакетом над нулевым уровнем появляется короткий положительный выброс.

Периодограмма изменения глубины и увеличенные изображения каверн на различных этапах эволюции представлены на рис. 2 при включении встречного светового потока (каждая группа изображений приведена с собственным масштабом).

Геометрия первичной каверны повторяется достаточно точно от опыта к опыту, длительность ее существования здесь составила  $\Delta t \approx 49$  мс. Далее, с задержкой  $\Delta t = 133,75 \pm 1,5$  мс, связанной с движением всплеска и капли с его вершины, начинается формирование последующих каверн, сопровождающееся вбросом крупных и мелких пузырьков.

Для второй каверны, связанной с погружением всплеска, характерно наличие двух локальных максимумов глубины. Кривая отражает сложный характер взаимодействия погружающегося всплеска с движущейся жидкостью, в которой сохраняются тонкие течения, сопровождающие эволюцию первичной каверны. Основная часть процесса схлопывания третьей каверны проходит достаточно быстро, в течение  $0,5 \dots 1$  мс.

Далее граница остатка каверны линейно движется к первоначальному положению свободной поверхности. Четвертая каверна возникает при слиянии капли, ранее выброшенной с вершины всплеска, с деформированной поверхностью жидкости, в которой сохраняется полость после частичного схлопывания третьей каверны. Последняя каверна, изрезанная капиллярными волнами, имеет наиболее сложную нерегулярную форму с отдельными выступами и впадинами.

Плавное увеличение глубины каверны, когда кинетическая энергия переходит в потенциальную гравитационную и доступную потенциальную поверхностную энергию (ДППЭ) существенно отличается от неравномерного темпа убывания глубины в конце процесса коллапса. Здесь наблюдается дополнительное ускорение движения дна, обусловленное быстрым освобождением ДППЭ и ее трансформацией в другие формы. На этом этапе происходит формирование быстро движущихся газовых полостей, излучающих звук.

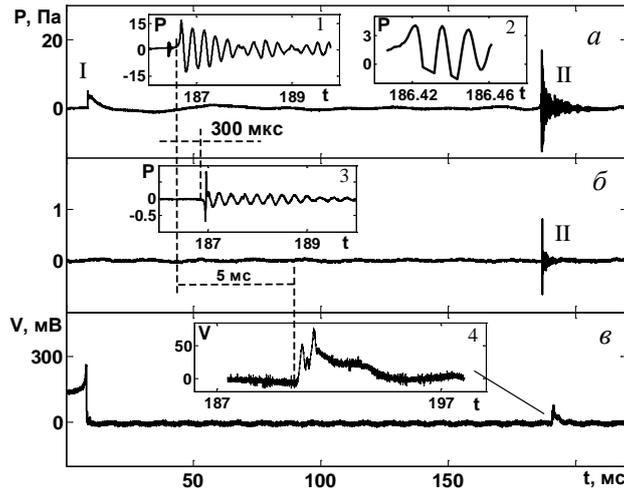


Рис. 1. Сигналы гидрофона (*а*), микрофона (*б*), и лазерного детектора смещения поверхности (*в*) импакта капли диаметром  $D=0,4$  см, контактирующей с поверхностью принимающей жидкости со скоростью  $U=3,4$  м/с (вставки: фрагменты сигналов).

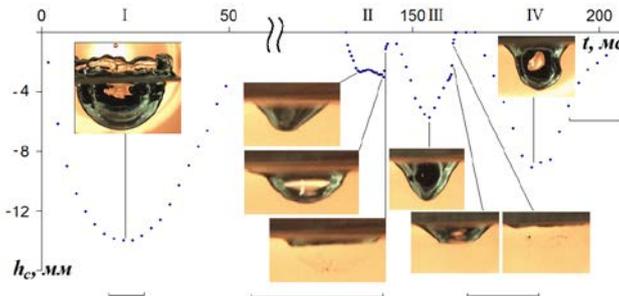


Рис. 2. Изменения положения свободной поверхности и фотографии картины течений импакта капли диаметром  $D=0,42$  см, контактирующей с жидкостью со скоростью  $U=3,1$  м/с.

Каверны: I — первичная; II — под основанием всплеска; III — за полным погружением вершины всплеска; IV — след вторичной капли, вылетевшей с вершины всплеска; длины маркеров — 1 см.

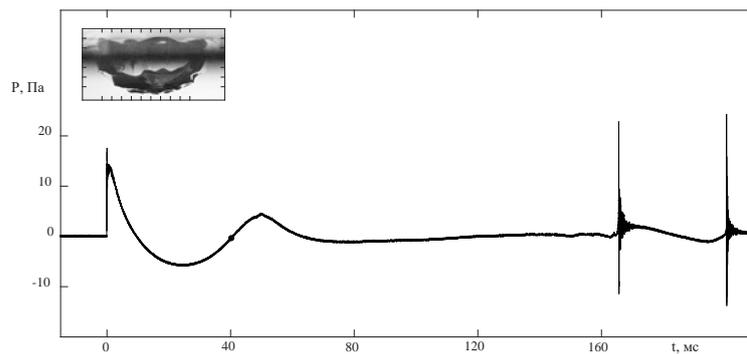


Рис. 3. Фонограмма гидрофона и фотографии картины течения.

Вставки 1 и 2 — ударный импульс I и пакет II; 3 — спектр пакета II; 4, 5 — пакет III и его спектр; врезки (деление — 2 мм): *а* — каверна,  $t=40,2$  мс; *б-д* — газовая полость при  $t=163,7; 165,2; 165,5; 166,2$  мс; *е-з* — вторичная каверна,  $t=186,2$  мс, растущая  $t=200,5$  мс; *ж* — оторвавшаяся газовая полость  $t=203,5$  мс ( $D=0,5$  см,  $U=3,2$  м/с).

Общая картина течений и динамика изменения размеров каверн устойчиво воспроизводятся от опыта к опыту. Коллапс второй каверны с формированием облака

«вмороженных» пузырьков наблюдался во всех проведенных экспериментах в данном режиме течений. Типичная фонограмма гидрофона при отрыве газовой полости сложной формы приведена на рис. 3. Здесь кроме основной кривой — зависимости давления от времени — на врезках представлены развертки пакетов, их спектры, фотографии каверны и ее участков. Контакт капли с принимающей жидкостью на фонограмме соответствует ударный импульс I, за которым следует спад и плавный подъем, связанные с заглужением каверны и возвышением венца. В развертке пакета I (вставка 1) выражен начальный импульс и высокочастотные затухающие осцилляции на спадающем участке. Основной сигнал II (развертка на вставке 2) начинается с резкого нарастания, которое переходит в немонотонно спадающие осцилляции с основной частотой  $f = 6,8$  кГц (спектр на вставке 3). На спектре к основному максимуму примыкают боковые лепестки на частотах  $f = 4,1$  и  $5,5$  кГц. В резонансном пакете III также выражен фронт, с последующими спадающими группами колебаний (развертка на вставке 4). В спектре пакета III главный максимум — на частоте  $f = 16,7$  кГц, к нему слева примыкают низкочастотные вторичные пики ( $f = 5,1; 5,3$  и  $6,5$  кГц).

Картины течений, синхронизованные с излучением основных звуковых пакетов, приводятся на врезках *a–з* (рис. 3). В фазе коллапса ( $t = 40,2$  мс, вставка *a*, метка (•) на фонограмме) округлое дно каверны покрывается трехмерными возмущениями сложной формы. Вторая капля, ранее выброшенная с вершины всплеска, формирует коническую каверну с вытянутым центром, который отсекается тонкими течениями и трансформируется в газовую полость (вставка *b*,  $t = 163,7$  мс). Стенки каверны деформируются тонкими приповерхностными течениями, которые порождаются трансформацией двойного энергетически нагруженного поверхностного слоя. При этом одновременно идут два процесса — быстрое «уничтожение» свободной поверхности ( $\tau_{\sigma} \sim 10^{-8}$  с) сливающихся жидкостей и медленное образование новой свободной поверхности растущих каверны и венца ( $\tau_d \sim 10^{-3}$  с).

При коллапсе каверны газовая полость отсекается приповерхностным течением (светлая горизонтальная полоса на вставке *b*,  $t = 165,2$  мс), и образует угловатый газовый фрагмент (вставка *c*,  $t = 165,5$  мс). От него отделяется нижняя часть и стягивается в пузырек. Оставшаяся часть фрагмента трансформируется в полость неправильной формы (вставка *d*,  $t = 166,2$  мс), и затем в сферический пузырек. Падение новой капли формирует следующую коническую каверну с плоским дном (вставка *e*,  $t = 186,2$  мс).

Структура акустического сигнала существенно меняется при падении большого числа капель, моделирующих дождь. Взволнованную поверхность жидкости создавали около 200 падающих струй, распадающихся на капли. Типичная фонограмма гидрофона, установленного в центре области падения капель на глубине 5 см (рис. 4, *a*), в данной временной шкале имеет вид шумовой дорожки размахом 5 Па с отдельными выбросами до 10 Па. Спектры начинаются с частоты 1 кГц, с ростом частоты их поведение существенно различается.

Растянутый фрагмент фонограммы длительностью 10 мс ( $t = 1328–1338$  мс) иллюстрирует поведение акустического сигнала вблизи отметки I (рис. 4, *a*). Начальный участок представляет собой низкочастотный шум, который затем переходит в высокочастотные осцилляции, в спектре которых — два выраженных пика на частотах 5,5 и 11,0 кГц. Отметим, что в ранних работах в экспериментах по измерению акустического шума искусственного и реального дождя спектральные пики наблюдались в диапазоне до 15 кГц [1].

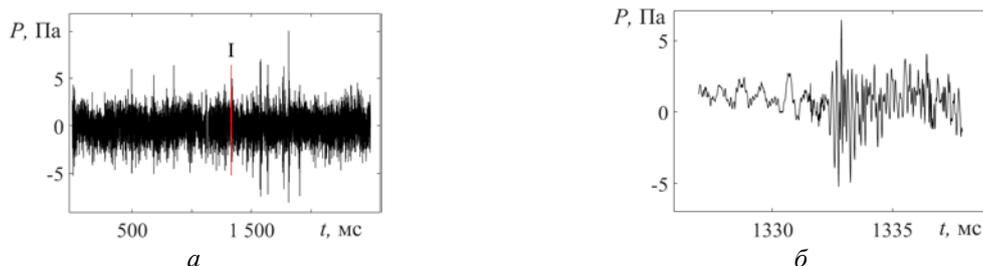


Рис. 4. Полная фонограмма искусственного дождя (*a*) и развертка участка I (*b*).

Проведенные опыты показали, что в последовательности процессов, инициированных слиянием свободно падающей капли с принимающей жидкостью, наблюдаются несколько групп капиллярных волн и отдельные звуковые пакеты. Кольцевые капиллярные волны начинают формироваться вокруг линии слияния жидкостей на дне каверны и вокруг венца. Системы волн сбегает от кромки вниз по стенкам венца и дну каверны. Новые группы капиллярных волн образуются при каждой перестройке картины течения, в частности, при прекращении роста высоты венца. Группы более коротких волн также образуются при росте всплеска и его погружении, падении вторичных капель, формировании новых каверн, выбросе и погружении стримера и вторичных капелек. Максимальной длиной, амплитудой и размером пакета характеризуются внешние капиллярные волны, охватывающие растекающийся венец. Одновременно с волнами образуются лигаменты — тонкие приповерхностные течения, играющие важную роль в формировании и в разрыве газовых полостей, в процессах генерации звуковых пакетов.

Первый высокочастотный звуковой пакет регистрируется во всех проведенных опытах и гидрофоном в виде ударного импульса, и микрофоном в форме размытого сигнала. Сопоставление картин подводных течений и акустических сигналов показало синхронность процессов генерации второго и последующих резонансных звуковых пакетов и отрыва газовых полостей от каверны, формирующейся при погружении капли, или разрыва полостей на фрагменты. Частота звука в пакете определяется объемом фрагмента, а длительность звучания — ходом процесса трансформации формы излучающего объема газа к гладкой сфероидальной.

Динамику и энергетику тонких течений определяют процессы передачи кинетической энергии капли и быстрого преобразования доступной потенциальной внутренней энергии при слиянии жидкостей и уничтожении свободных поверхностей. Преобразованная внутренняя энергия остается в тонком слое толщиной порядка размера молекулярного кластера, где возникают большие возмущения температуры и давления, который со временем утолщается. Тонкие течения быстро затухают и образуются вновь при каждом изменении структуры течения и генерации новой группы капиллярных волн.

Сопоставление картин подводных течений и акустических сигналов показало синхронность процессов генерации второго и последующих резонансных звуковых пакетов и отрыва газовых полостей от каверны, формирующейся при погружении капли, или разрыва полостей на фрагменты. Частота звука в пакете определяется объемом фрагмента, а длительность звучания — ходом процесса трансформации излучающего газового объема к гладкой сфероидальной форме. При неизменных условиях характер излучения и параметры акустических пакетов значительно менялись от опыта к опыту. В число вероятных причин наблюдаемой нестационарности сигналов входят варибельность формы капли, а также высокий темп преобразования ДППЭ при слиянии капли с принимающей жидкостью и уничтожении свободной поверхности [5]. Основу описания таких процессов составляет решения системы фундаментальных уравнений механики жидкостей, включающих уравнения состояния для потенциала Гиббса и плотности, построенные с физически обоснованными начальными и граничными условиями с учетом требования условия совместности.

### *Литература*

1. Bjorno L. Underwater rain noise: sources, spectra and interpretations // J. De Physique IV. Colloque C5. Supplement de J. De Physique 3. 1994. Vol. 4. P. C5-1023–C5-1030.
2. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Акустика и гидродинамика удара капли о водную поверхность // Акустический журнал. 2017. Т. 63, № 1. С. 38–49. DOI: 10.1134/S1063771016060038.
3. Chashechkin Yu. D. Fast superfine components and sound packets in flows induced by a drop impact on a target fluid at rest // FDMP. 2020. Vol. 16, № 4. P. 773–800. DOI:10.32604/fdmp.2020.09001.
4. Чашечкин Ю. Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2021. № 1(94). С. 73–92. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-1-73-92>.
5. Chashechkin Y. D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // Axioms. 2021. Vol. 10. Iss.4. 286 p. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 19-19-00598, <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>). Опыты проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН».

## КОМПОНЕНТЫ ИМПАКТА КАПЛИ: ГЕНЕРАЦИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН И ПУЗЫРЕЙ

А. Ю. Ильиных, канд. физ.-мат. наук

ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

## DROP IMPACT COMPONENTS: GENERATION OF CAPILLARY WAVES AND BUBBLES

A. Yu. Ilinykh, Ph.D.

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, RAS, Moscow, Russia

*В работе рассматриваются механизмы генерации волн капиллярного масштаба на базовых компонентах течений (собственно капля, каверна, венец, всплеск, поверхность принимающей жидкости), возникающих у поверхности глубокой жидкости при погружении в нее свободно падающей капли в режимах интрузии и всплеска, а также механизмы генерации в принимающей жидкости групп пузырей различной дисперсности. Эволюция картины переноса вещества капли в принимающую жидкость исследована методами фото- и высокоскоростной видеорегистрации с учетом собственных масштабов задачи в широком диапазоне параметров.*

*The paper considers the mechanisms of generation of capillary-scale waves on the basic components of flows (drop itself, cavity, crown, burst, surface of a target fluid) that occur near the surface of a deep liquid when a free-falling drop is immersed in it in the intrusion and splash modes, as well as the mechanisms of generation groups of bubbles of different dispersion in target fluid. The evolution of the flow pattern of the drop material transfer into the target fluid is studied by the methods of photo- and high-speed video recording taking into account the problem of scales in a wide range of parameters.*

В ряде технологических, технических и природных процессов ключевую роль играют процессы перераспределения массы и энергии капель при столкновении со слоем жидкости (при импакте). Такие технологии находят применение в химической, нефтехимической и биохимической промышленности, в охлаждающих системах (космические холодильники), системах пожаротушения и профилактики возгораний [1], печати, разделении и смешивании веществ. Большое внимание уделяется анализу механизмов эрозии, капельного обмена минеральными и органическими веществами, биоматериалами (вирусами, микробами) между атмосферой и гидросферой [2].

Импакт капли включает в себя ряд структурных компонентов: сравнительно медленных базовых (венец, каверна, всплеск, каскады вихревых колец), и быстрых мелкомасштабных (пелена мелких струек и брызг, капиллярные волны, лигаменты), а также генерацией звуковых пакетов как в воздухе, так и в принимающей среде. Карта режимов, в которую входит набор базовых и сопроводительных компонентов, задается параметрами задачи (энергетикой капли, физическими и термодинамическими параметрами сред) [3]. Число, геометрические и физические параметры компонентов определяются наборами размерных и безразмерных параметров.

В акустическом сигнале импакта капли выделяются первичный высокочастотный импульс и запаздывающие низкочастотные пакеты, излучаемые осциллирующими газовыми пузырьками [4]. Особый интерес представляет определение условий и поиск механизмов их формирования [5]. В качестве источника газовых полостей рассматривается схлопывание [6] или быстрое заполнение [7] первой и последующей каверн сложной формы с образованием и разрывом крупных осциллирующих пузырей [6]. На размеры, форму и частоту образования газовых полостей влияют осцилляции падающей капли и деформированной поверхности принимающей жидкости [6]. Первичный газовый пузырь образуется уже в пятне контакта капли с принимающей жидкостью.

Система уравнений задачи включает уравнения переноса массы, импульса и энергии, а также потенциал Гиббса с дополнительными членами для поверхностного и приповерхностного слоев [8]. Механизмы переноса, предмет актуальных теоретических и экспериментальных исследований, включают вихри, волны и связывающие их лигаменты. Генерация групп коротких капиллярных волн на поверхностях базовых структурных компонентов (капля, каверны, венец,

струи и, собственно, поверхность принимающей жидкости) сопровождает весь процесс погружения капли. В задаче рассматриваются макроскопические механизмы переноса энергии течением со скоростью  $\mathbf{u}$  и волнами с групповой скоростью  $c_g$ , а также микроскопический атомно-молекулярный перенос (медленный диссипативно-диффузионный, и быстрый, обусловленный уничтожением свободных поверхностей контактирующих жидкостей и конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) в другие формы [9]).

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование тонкоструктурных компонентов импакта капли: образование и эволюция волн капиллярного масштаба, образующихся на поверхностях базовых компонентов течений, а также газовых пузырей различной дисперсности, отвечающих за формирование акустических пакетов при погружении капель в глубокую жидкость. Эволюция картины переноса вещества капли в принимающую жидкость исследована методами фото- и высокоскоростной видеорегистрации с учетом собственных масштабов задачи в широком диапазоне параметров. Опыты выполнены на стенде ТБП, входящем в состав комплекса «УСУ ГФК ИПМех РАН».

В число размерных параметров задачи входят условия эксперимента (диаметр  $D = 0,3 \div 0,5$  см и высота  $h = 1 \div 200$  см падения капли (скорость в момент контакта  $U = 0,34 \div 4,3$  м/с), ускорение свободного падения  $\mathbf{g}$  и физические свойства взаимодействующих сред: плотности  $\rho_{d,t,a}$  кинематические  $\nu_{d,t,a}$  и динамические  $\eta_{d,t,a}$  вязкости, коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma_d^a$ ,  $\sigma_t^a$  и их отношения, где индекс  $d$  соответствует капле,  $t$  — принимающей жидкости,  $a$  — среде, в которой происходит взаимодействие (воздух). В работе оценивались кинетические  $E_d = MU^2/2$  и поверхностные  $E_\sigma = \sigma S_d$  энергии капель. Температуры жидкостей и среды считаются равными  $T_d = T_t = T_a$ . Отношение кинетической и потенциальной энергии определяет режим течения (набор структурных компонентов): интрузивный для  $E_k < E_\sigma$  и режим всплеска при  $E_k > E_\sigma$ .

Поверхностная энергия равномерно распределена в тонком шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см. За время  $\Delta t_\sigma = \delta_\sigma / U \sim 10^{-8}$  с в выражении для потенциала Гиббса  $dg_s = -sdT + VdP + \sigma dS_b + \mu_n dN_n$  исчезают дополнительные члены  $\sigma dS_b$  и  $\mu_n dN_n$  [10].

В экспериментах использовались водные растворы ализариновых чернил и солей (перманганат калия, медный и железный купорос, натриевые соли). Отношения размерных параметров задачи задают наборы безразмерных комбинаций, включающие традиционные числа: Рейнольдса  $1450 < Re < 18000$ , Фруда  $2,8 < Fr < 450$ , Бонда  $Bo = 2,39$ , Онезорге  $Oh = 0,0018$ , Вебера  $6,7 < We < 1100$ .

Для интрузивного режима характерно формирование в принимающей жидкости сплошного объема капельной жидкости в форме погружающегося вихря (интрузии). Каверна при этом образуется с некоторой задержкой [11]. Высвобождающейся энергии в зоне контакта недостаточно для развития выраженной эжекты и венца, кольцевая волна втягивается в интрузию. В процессе слияния кольцевые капиллярные волны наблюдаются также на поверхностях принимающей жидкости и погружающейся капли.

По мере увеличения кинетической энергии капли скорость растет и энергия эжектируемой вокруг области контакта дисковой пелены, изрезанной группами тонких стримеров и брызг, число которых существенно возрастает. Скорости вылета брызг из области слияния значительно (в 4–5 раз) превосходят скорость капли. Эжекция брызг и капель с шипов шеврона происходит циклически (эшелонами). Со временем увеличивается как угол вылета брызг и капель (от  $5^\circ$ – $6^\circ$  при первичном контакте до  $90^\circ$  на этапе схлопывания каверны), так и их линейный размер (капли до 1 мм) [12].

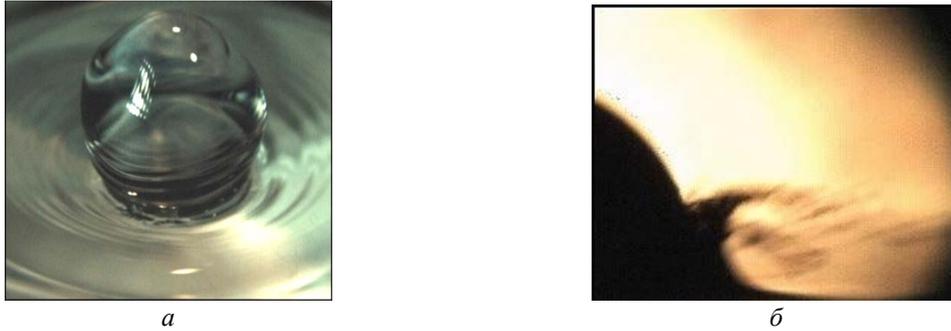


Рис. 1. Капиллярные волны на поверхности капли и принимающей жидкости (а), распад контактной поверхности на множественные брызги (б).

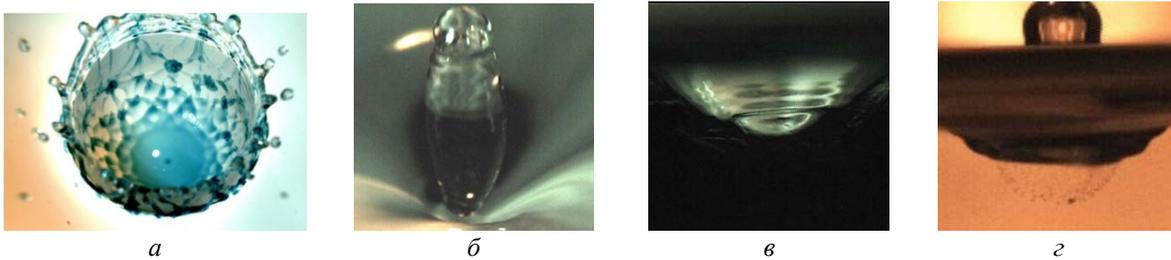


Рис. 2. Режим всплеска.

а — дискретные структуры импакта; б — капиллярные волны на поверхности всплеска; в —заполняющейся вторичной каверны; г — облако мелких пузырей.

В режиме всплеска регистрируется значительно большее количество групп капиллярных волн на разных фазах импакта: сверхкороткие кольцевые капиллярные волны около линии контакта погружающейся капли на временах порядка 0,2–0,5 мс от соприкосновения. Тонкие брызги пелены ориентированы в широком диапазоне углов, попадают на поверхность погружающейся капли при  $R_\sigma = (\sigma_t - \sigma_d) / (\sigma_t + \sigma_d) \leq 0$ , что приводит к генерации групп капиллярных волн, периодически расположенных по линии контакта жидкостей.

Режим всплеска характеризуется перераспределением вещества капли по поверхности каверны и венца. Для смешивающихся жидкостей характерно дискретное распределение вещества капли: лигаменты формируют вертикальные полосы на поверхности венца и сетчатую структуру с трех-, четырех- и пятиугольными ячейками на поверхности каверны (рис. 2, а). Число ярусов сетки и концентрация вещества капли в структуре зависят кинетической энергии капли [13]. Одновременно с заполнением каверны происходит спадание венца: с его вершины по поверхности сбегает капиллярные волны (длина растет со временем) к центру каверны, где формируется всплеск. Система кольцевых капиллярных волн длиной  $\lambda_c \approx 0,5 \div 1$  мм движется радиально и от области контакта жидкостей, рассмотрена подробно в [14].

Капиллярные волны наблюдаются позднее на вершине струи при отрыве вторичных капель (длиной  $\lambda_c \sim 0,5$  мм) и на заостренном основании струи при ее отрыве от деформированной принимающей жидкости ( $\lambda_c = 0,1 \div 0,15$  мм, рис. 2, б).

За отрывом струи следует ее частичное сжатие и формирование вторичной каверны в принимающей жидкости, в которую погружается струя. На поверхности остатка заполняющейся каверны наблюдаются короткие капиллярные волны (рис. 2, в) [15]. Погружение струи и мгновенное заполнение полости каверны обуславливают формирование в принимающей жидкости облака газовых полостей и пузырей в широком диапазоне размеров, структура которых сохраняет форму каверны (рис. 2, г).

Третья каверна образуется при погружении вершины всплеска. Четвертую каверну формирует возвращающаяся капля, ранее вылетевшая с вершины всплеска, которая соприкасается боковой поверхностью со стенками остатка третьей каверны. На каждом этапе формируются излучающие звук группы пузырей.

Генерация быстрых компонентов импакта капли обусловлена процессами конверсии ДППЭ в другие формы (флуктуации давления и температуры, движение новых компонентов с образованием новых поверхностей) в зоне слияния при уничтожении контактных поверхностей. Дальнейшая эволюция тонких течений включает формирование венца и каверны с дискретным распределением вещества, выброс брызг, генерацию коротких капиллярных волн на вновь образованных компонентах течений и наборов газовых пузырей в области схлопывания последовательности каверн.

### *Литература*

1. Lan M., Wang X., Zhu P., Chen P. Experimental Study on the Dynamic Process of a Water Drop with Additives Impact upon Hot Liquid Fuel Surfaces // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 66. P. 17–176
2. Bhagat R. B., Wykes M. S. D., Dalziel S. B., Linden P. F. Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19 // *J. Fluid Mech.* 2020. Vol. 903, F1.
3. Ray B., Biswas G., Sharma A. Oblique drop impact on deep and shallow liquid // *Commun. Comput. Phys.* 2012. Vol. 11(4). P. 1386–1396.
4. Prosperetti A., Oguz H.N. The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1993. Vol. 25. P. 577–602.
5. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Тонкая структура акустических сигналов, вызванных падением капли на водную поверхность // *Докл. РАН*. 2015. Т. 463, № 5. С. 538–542.
6. Чашечкин Ю. Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // *Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана «Естественные науки»*. 2021. № 1(94). С. 73–92.
7. Gillot G., Derec C., Genevaux J.-M., Simon L. Benyahia L. A new insight on a mechanism of airborne and underwater sound of a drop impacting a liquid surface // *Phys. Fluids*. 2020. Vol. 32. P. 062004.
8. Chashechkin Yu. D. Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // *Mathematics*. 2021. Vol. 9, №. 586.
9. Чашечкин Ю. Д. Пакеты капиллярных и акустических волн импакта капли // *Вест. МГТУ им. Н.Э. Баумана «Естественные науки»*. 2021. № 1(94). С. 73–92.
10. Teschke O., de Souza E.F. Water molecule clusters measured at water/air interfaces using atomic force microscopy // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2005. Vol. 7 (22). P. 3856–3865.
11. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // *ДАН*. 2021. Т. 496, № 1. С. 45–50.
12. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Множественные выбросы брызг при ударе капли // *ДАН*. 2020, Т. 494. С. 42–46.
13. Ильиных А. Ю. Тонкоструктурные компоненты всплеска капли // *ПММ*. 2019. Т. 83, № 3. С. 413–427.
14. Zhu G. Z., Li Z. H., Fu D. Y. Experiments on ring wave packet generated by water drop // *Chin. Sci. Bull.* 2008. Vol. 53. P. 1634–1638. DOI: 10.1007/s11434-008-0246
15. Чашечкин Ю. Д., Ильиных А. Ю. Эволюция формы последовательных каверн импакта свободно падающей капли // *Докл. РАН «Физика, технические науки»*. 2022. Т. 502. С. 36–44.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598 «Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью», <https://rscf.ru/project/19-19-00598/>).

## ВЛИЯНИЕ СЖИМАЮЩИХ УСИЛИЙ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ НА ГЕНЕРАЦИЮ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

*И. В. Стурова*, д-р физ.-мат. наук, *Л. А. Ткачева*, канд. физ.-мат. наук  
ФГБУН Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

## INFLUENCE OF COMPRESSIVE FORCES IN THE ICE COVER ON THE GENERATION OF FLEXURAL-GRAVITY WAVES

*I. V. Sturova*, Dr.Sc., *L. A. Tkacheva*, Ph.D.  
Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

*Изучена генерация волн при движении внешней нагрузки и обтекании погруженной сферы. Движущаяся нагрузка может представлять собой обычный автомобиль, самолет на режимах взлета или посадки, а также судно на воздушной подушке. Исследовано влияние неравномерного (продольного, поперечного и сдвигового) сжатия ледяного покрова на развитие волнового движения, возникающего при мгновенном старте и последующем равномерном движении. Определены прогибы и деформации ледяного покрова, а также волновые силы. Показано существенное влияние сжимающих усилий на поведение ледяного покрова и значения волновых сил, действующих на внешнюю нагрузку, и малое влияние на волновые силы погруженной сферы.*

*The generation of waves during the motion of an external load and the flow around a submerged sphere is studied. The moving load can be an ordinary car, an aircraft in takeoff or landing modes, or a hovercraft. The influence of non-uniform (longitudinal, transverse and shear) compression of the ice cover on the development of wave motion that occurs during an instantaneous start and subsequent uniform motion has been studied. Deflections and deformations of the ice cover as well as wave forces are determined. A significant effect of compressive forces on the behavior of the ice cover and the values of the wave forces acting on the external load, and a small effect on the wave forces of the submerged sphere is shown.*

**Введение.** В последние десятилетия активно исследуются волновые движения, возникающие в жидкости, которая ограничена сверху плавающей тонкой упругой пластиной. Это необходимо для учета плавающего ледяного покрова, а также для проектирования и эксплуатации искусственных платформ больших размеров. Волны, возникающие в такой жидкости, называются изгибно-гравитационными (ИГВ), так как их свойства зависят как от свойств жидкости, так и от свойств упругого покрытия. К настоящему времени сравнительно хорошо исследованы процессы генерации и распространения пространственных ИГВ для изначально ненапряженного, однородного и изотропного ледяного покрова [1]. Однако ледяной покров может подвергаться сжатию или растяжению под воздействием ветра, течений или температурных деформаций.

**Действие внешней нагрузки.** Рассматривается бесконечно протяженный ледяной покров постоянной толщины  $h_1$  и плотности  $\rho_1$ , плавающий на поверхности идеальной несжимаемой жидкости глубины  $H$ . Предполагается, что в ледяном покрове, который моделируется тонкой упругой пластиной, существуют сжимающие усилия [2, 3]. Жидкость и пластина первоначально являются невозмущенными. Начиная с момента времени  $t = 0$ , на пластину действует заданное локализованное внешнее давление, которое затем движется прямолинейно с постоянной скоростью  $U$ . Вводится система координат  $x, y, z$ , связанная с движущимся давлением, где  $x$  и  $y$  — горизонтальные координаты, а  $z$  — вертикальная координата, направленная вверх. Ось  $x$  совпадает с направлением движения нагрузки. Возникающее течение жидкости полагается потенциальным, а скорость частиц жидкости и прогиб пластины — малыми. Предполагается, что во все моменты времени жидкость находится в контакте с пластиной.

Задача о поведении пластины и жидкости сводится к решению уравнения Лапласа для потенциала скоростей частиц жидкости

$$\Delta_3 \phi = 0 \quad (-\infty < x, y < \infty, -H \leq z \leq 0); \quad \Delta_3 \equiv \Delta_2 + \partial^2 / \partial z^2; \quad \Delta_2 \equiv \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$D\Delta_2^2 w + Q_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + Q_2 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2Q_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + M \left( \frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 w + \rho g w + \rho \left( \frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi = -P(x, y, t) \quad (z=0);$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} - U \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (z=0); \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (z=-H); \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \nabla \phi = 0 \quad (t \geq 0) \quad (r^2 = x^2 + y^2) \quad (2)$$

и начальными условиями  $\varphi(x, y, z, 0) = w(x, y, 0) = 0$ . Здесь  $w(x, y, t)$  — нормальный прогиб упругой пластины, ее цилиндрическая жесткость  $D = Eh_1^3 / [12(1 - \nu^2)]$ ,  $M = \rho_1 h_1$ ;  $E, \nu$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона пластины;  $Q_1, Q_2, Q_3$  — продольные, поперечные и сдвиговые усилия (сжатие при положительных значениях и растяжение при отрицательных значениях) по соответствующим направлениям;  $\rho$  — плотность жидкости,  $P(x, y, t)$  — внешнее давление,  $g$  — ускорение свободного падения. Далее будет рассматриваться действие только сжимающих усилий, т.е.  $Q_j \geq 0$  ( $j=1,2,3$ ). Внешнее давление отлично от нуля только при  $t \geq 0$  в прямоугольнике длиной  $2a$  и шириной  $2b$

$$P(x, y, t) = P_0 = const \quad (|x| \leq a, |y| \leq b, t \geq 0). \quad (3)$$

Используя преобразования Фурье, находим решение задачи (1)–(3)

$$w(x, y, t) = -\frac{P_0}{\pi^2} \int_0^\infty B(k) \int_0^{\pi/2} C(k, \theta) [G_+(k, \theta, t) + G_-(k, \theta, t)] d\theta dk; \quad (4)$$

$$C(k, \theta) = \sin(ak \cos \theta) \sin(bk \sin \theta) / (\sin \theta \cos \theta);$$

$$G_\pm = \frac{1}{\omega_\pm} \{ \Lambda_1^\pm \cos[k(x \cos \theta \pm y \sin \theta)] + \Lambda_2^\pm \sin[k(x \cos \theta \pm y \sin \theta)] \};$$

$$\Lambda_1^\pm = \frac{1 - \cos[(\omega_\pm + kU \cos \theta)t]}{\omega_\pm + kU \cos \theta} + \frac{1 - \cos[(\omega_\pm - kU \cos \theta)t]}{\omega_\pm - kU \cos \theta}; \quad \omega_\pm = \omega(k, \pm \theta);$$

$$\Lambda_2^\pm = \frac{\sin[(\omega_\pm + kU \cos \theta)t]}{\omega_\pm + kU \cos \theta} - \frac{\sin[(\omega_\pm - kU \cos \theta)t]}{\omega_\pm - kU \cos \theta}; \quad \omega(k, \theta) = \sqrt{kB(k)[Dk^4 - Q(\theta)k^2 + \rho g]};$$

$$B(k) = [Mk + \rho cth(kH)]^{-1}; \quad Q(\theta) = Q_1 \cos^2 \theta + Q_2 \sin^2 \theta + Q_3 \sin(2\theta).$$

Внешнее давление (3) моделирует, например, судно на воздушной подушке (СВП). При движении по ледяному покрову на судно действуют волновые силы в направлении горизонтальных осей  $x$  и  $y$ : волновое сопротивление  $R_x$  и боковая сила  $R_y$

$$R_{x,y} = -P_0 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left( \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y} \right) dx dy.$$

При  $t \rightarrow \infty$  поведение жидкости и пластины становится установившимся. Решение данной задачи для бесконечно глубокой жидкости получено в [4]. Известно [1, 2], что для стационарной задачи существует критическая скорость движения нагрузки  $U_c$  такая, что при  $U < U_c$  в дальнем поле не возникает волновых движений. На рис. 1 представлены прогибы ледяного покрова, возникающие при движении СВП со скоростью 10 м/с. Используются

следующие параметры внешнего давления в (3):  $P_0=10^3$  Па,  $a=20$  м,  $b=10$  м. Исходные данные для ледяного покрова и жидкости равны:

$$E=5 \text{ ГПа}, \rho_l=922,5 \text{ кг/м}^3, \nu=0,3, h_l=1 \text{ м}, (Q_1, Q_2, Q_3) = (1,5; 1,2; 0,6)\sqrt{g\rho D}, \rho=1025 \text{ кг/м}^3 \quad (5).$$

Решение нестационарной задачи (4) при  $H=350$  м и  $t\sqrt{g/a} = 20$  показано на рис. 1, а, а решение стационарной задачи для бесконечно глубокой жидкости — на рис. 1, б. Видно, что волновые картины близки друг к другу. Скорость движения СВП при используемых параметрах сжатия является сверхкритической и возникающие ИГВ распространяются как вниз, так и вверх по потоку. Волновой след несимметричен относительно движения судна, так как сдвиговое сжатие ледяного потока отлично от нуля.

Безразмерные значения волнового сопротивления и боковой силы

$$(\bar{R}_x, \bar{R}_y) = -g\rho(R_x, R_y)/(2bP_0^2),$$

действующие на СВП в стационарной задаче, показаны на рис. 2 для различных углов  $\beta$  движения судна относительно оси  $x$ . При неравномерном сжатии ледяного покрова значения компонент  $Q_j$  зависят от угла  $\beta$ , что приводит к изменению критической скорости  $U_c$  [2–4]. При  $U < U_c$  волновые силы тождественно равны нулю. Максимальные значения волновых сил в рассмотренных случаях имеют место при движении судна под углом  $\beta = 135^\circ$  к исходной системе координат. Значение знака боковой силы совпадает со знаком сдвигового сжатия. При отсутствии сжимающих усилий  $Q_j = 0$  ( $j = 1,2,3$ ) критическая скорость  $U_c$  больше, а максимальное значение волнового сопротивления меньше, чем при наличии сжатия. Однако с ростом скорости движения СВП влияние сжатия уменьшается.

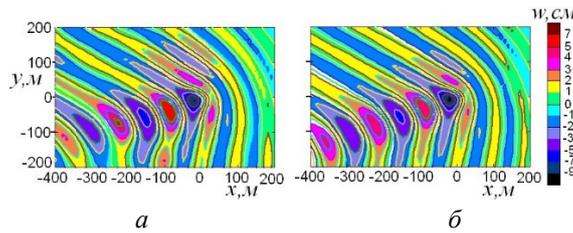


Рис. 1. Вертикальные прогибы ледяного покрова для нестационарной (а) и стационарной (б) задачи.

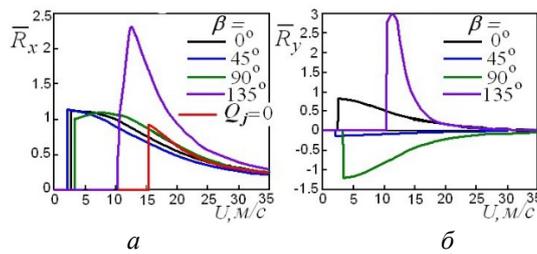


Рис. 2. Зависимость волнового сопротивления (а) и боковой силы (б) от скорости движения.

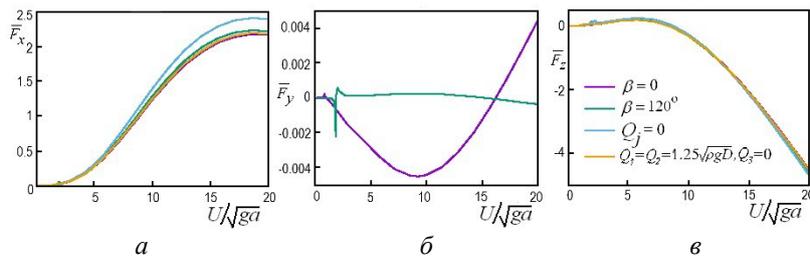


Рис. 3. Зависимость волнового сопротивления (а), боковой силы (б) и подъемной силы (в) от скорости движения сферы.

**Движение погруженной сферы.** Решена задача о прямолинейном равномерном движении сферы радиуса  $a$  в жидкости бесконечной глубины под ледяным покровом. Потенциал скоростей частиц жидкости запишем в виде  $\Phi(x, y, z) = U[\phi(x, y, z) - x]$ , где функция  $\phi(x, y, z)$  удовлетворяет уравнению Лапласа с граничными условиями

$$\left( D\Delta_2^2 + Q_1 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + Q_2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} + 2Q_3 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + MU^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \rho g \right) \frac{\partial \phi}{\partial z} + \rho U^2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\partial w}{\partial x} \quad (z=0),$$

условием затухания в дальнем поле и условием излучения, согласно которому перед телом распространяются только те волны, групповая скорость которых больше скорости тела. На поверхности сферы  $S: x^2 + y^2 + (z+h)^2 = a^2$  ставится условие непротекания:  $\partial \phi / \partial n = n_1$ , где  $h$  — глубина погружения сферы,  $n$  — внутренняя нормаль к ней,  $n_1$  — компонента нормали по оси  $x$ . Для решения этой задачи используется метод мультипольных разложений [5]. Получено также решение начально-краевой задачи о движении погруженного под ледяным покровом диполя с моментом  $2\pi U a^3$ , который начинает действовать при  $t=0$  и далее движется горизонтально с постоянной скоростью  $U$ . Выполненное сопоставление прогибов ледяного покрова, полученных из решения задачи для сферы и дипольного приближения, показало хорошее согласование этих решений.

Определены гидродинамические силы, действующие на сферу

$$F_j = -\frac{1}{2} \rho U^2 \int_S \nabla(\phi - x) \nabla(\phi - x) n_j dS \quad (j=1,2,3).$$

Безразмерные коэффициенты сил: волновое сопротивление  $\bar{F}_x$ , боковая сила  $\bar{F}_y$  и подъемная сила  $\bar{F}_z$  равны  $(\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z) = (-F_1, F_2, F_3) / (\pi \rho g a^3)$  и представлены на рис. 3 при  $a=5$  м,  $h=10$  м. Используются параметры льда и жидкости  $E, \rho_1, h_1, \nu, \rho$ , указанные в (5). Для параметров сжатия  $(Q_1, Q_2, Q_3) = (1.5, 1, 0.5) \sqrt{g \rho D}$  показаны волновые силы при движении сферы под углом  $\beta = 0$  и  $\beta = 120^\circ$ . Для сравнения приведены значения волновых сил при отсутствии сжимающих усилий  $Q_j = 0$  ( $j=1,2,3$ ) и при равномерном сжатии  $Q_1 = Q_2 = 1.25 \sqrt{g \rho D}$ ,  $Q_3 = 0$ .

В этих двух последних случаях картина волнового движения не зависит от угла движения сферы по отношению к оси  $x$ .

#### Литература

1. Squire V. A., Hosking R. J., Kerr A. D., Langhorne P. J. Moving Loads on Ice Plates. Dordrecht: Kluwer, 1996.
2. Букатов А. Е., Жарков В. В., Завьялов Д. Д. Трехмерные изгибно-гравитационные волны при неравномерном сжатии // ПМТФ. 1991. № 6. С. 51–57.
3. Букатов А. Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017.
4. Стурова И. В. Движение нагрузки по ледяному покрову с неравномерным сжатием // Изв. РАН, МЖГ. 2021. № 4. С. 63–72.
5. Ткачева Л. А. Движение сферы в жидкости под ледяным покровом с неравномерным сжатием // ПМТФ. 2022. Т. 63, № 2 (в печати).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

*V. K. Kazankov, S. E. Kholodova*, д-р физ.-мат. наук  
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

## SIMULATION OF EXTREME WAVE PHENOMENA IN CONTINUOUS MEDIA

*V. K. Kazankov, S. E. Kholodova*, Dr.Sc.  
ITMO University, St. Petersburg, Russia

*Рассматривается задача о возможности существования особого нелинейного эффекта, возникающего в морской среде, называемого «волнами-убийцами». В работе представляется формальный аппарат, обобщающий понятие динамической системы, в котором удаётся сформулировать необходимые условия, накладываемые на систему, определяющие возникновение волны-убийцы.*

*The problem of the possibility of the existence of a special nonlinear effect that occurs in the marine environment, called «rogue waves», is considered. The paper presents a formal apparatus that generalizes the concept of a dynamic system, in which it is possible to formulate the necessary conditions imposed on the system, which determine the occurrence of a rogue wave.*

Известно, что в океанах возникают аномально большие волны, которые имеют разные формы и профили, но существуют и характерные черты, такие, как внезапное возникновение, сравнительно малый временной промежуток жизни и огромный разрушительный потенциал. Этот феномен получил название волны-убийцы [1, 2]. Несколько десятков лет назад волны-убийцы воспринимались как миф. Допускалось лишь существование «экстремальных волн», как явления, схожего на первый взгляд с явлением, возникновение которого не выходит за рамки статистического распределения случайного ветрового волнения. Прецедентом для независимого изучения волн-убийц стала «Новогодняя волна», зарегистрированная первого января 1995 г. на нефтяной платформе «Дропнер» [1, 2], появление которой было неожиданным событием, а статистические данные с приборов не согласовывались с теорией «экстремальных волн». Впоследствии было разработано несколько различных сценариев, объясняющих причины возникновения волн-убийц, а именно, проведены экспериментальные исследования, позволившие впервые сгенерировать волну-убийцу в бассейне путем столкновения волн под определенным углом [3]. Классическим методом описания динамики волн является использование аппарата дифференциальных уравнений в частных производных, система которых, как правило, является частным случаем системы Коши-Ковалевской, и, на первый взгляд, не содержащей волны-убийцы, однако в работах [4, 5] удалось показать обратное. С точки зрения случайных процессов нет ничего удивительного в возникновении аномально больших волн, даже если их статистические показатели выходят за рамки линейной теории, особенно при неограниченном временном воздействии на систему. Возникает необходимость в построении формального аппарата, объединяющего разные сценарии возникновения волн-убийц, не теряющего из вида саму природу возникновения феномена, причём каждый сценарий появления волн-убийц требует учёта энергетического обмена между волнами, что и послужило основой создания соответствующей аксиоматики, являющейся более общей структурой по сравнению с динамическими системами, позволившей доказать существование волн-убийц.

### **Литература**

1. Куркин А. А. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование / Под ред. А. А. Куркин, Е. Н. Пелиновский. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2016. 178 с. ISBN 978-5-4475-5883-3.
2. Brule S., Enoch S, Guenneau S. On the possibility of seismic rogue waves in very soft soils // Geophysics; Pattern Formation and Solitons; Computational Physics; Fluid Dynamics.
3. McAllister M. L., Draycott S., Adcock T. A. A., Taylor P. H., van den Bremer T. S. Laboratory recreation of the Draupner wave and the role of breaking in crossing seas // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 860. P. 767–786.
4. Р. В. Шамин, А. В. Юдин. Моделирование пространственно-временного распространения волн-убийц // Докл. РАН. 2013. Т. 448, № 5. С. 592–594.
5. Захаров В. Е., Шамин Р. В. Статистика волн-убийц в вычислительных экспериментах // Письма в ЖЭТФ. 96:1. 2012. С. 68–71.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА БАРОКЛИННЫХ ТЕЧЕНИЙ  
НА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ ШЕЛЬФЕ о. САХАЛИН  
(НЕГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

А. А. Куркин, д-р физ.-мат. наук, О. Е. Куркина, канд. физ.-мат. наук, Е. А. Рувинская, канд. физ.-мат. наук  
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Россия

SPATIAL STRUCTURE OF BAROCLINIC CURRENTS ON THE NORTH-EASTERN  
SHELF OF SAKHALIN ISLAND (NON-HYDROSTATIC NUMERICAL SIMULATION)

A. A. Kurkin, Dr.Sc., O. E. Kurkina, Ph.D., E. A. Rouvinskaya, Ph.D.  
R.E. Alekseev State Technical University of Nizhny Novgorod, Russia

*В настоящей работе представлены результаты численного моделирования динамики внутренних волн на северо-восточном шельфе о. Сахалин при генерирующем воздействии баротропного прилива с использованием параметризованных функций рельефа дна и стратификации плотности из климатических атласов. Показано, что бароклиническая компонента вносит существенный вклад в поле течений и имеет сложную пространственную структуру. Выделено несколько режимов трансформации длинных волн, получены оценки амплитуд как волн бароклинического прилива, так и короткопериодных внутренних волн, генерируемых на их фронтах.*

*This report presents the results of numerical simulation of the dynamics of internal waves on the northeastern shelf of Sakhalin Island under the forcing of a barotropic tide using parametrized functions of the bottom topography and density stratification from climate atlases. It is shown that the baroclinic component makes a significant contribution to the current field and has a complex spatial structure. Several modes of transformation of long waves are identified, and estimates of the amplitudes of both baroclinic tide waves and short-period internal waves generated at their fronts are obtained.*

**Введение.** Внутренние волны существенно влияют на временные и пространственные изменения поля плотности морской воды, что сказывается и на распространении акустических волн в океане (подробнее, например, в [1, 2]). Особенности волнового климата стратифицированного бассейна необходимо учитывать и при интерпретации результатов работы сонара, поскольку бароклинные течения могут порождать такие эффекты, как потери звука; множество работ посвящено связыванию мод акустических волн и возникновению волноводов в поле внутренних волн (например, [3, 4]). Влияние таких волн на звуковой сигнал на шельфе российских морей также активно исследуется in-situ ([5, 6] и мн. др.), однако, количество таких данных ограничено в связи с высокой стоимостью, огромными трудозатратами и сложными метеоусловиями, не позволяющими получить продолжительные непрерывные записи в северных и дальневосточных морях. Наряду с экспериментальными работами актуальны также работы, посвященные математическому моделированию волновых процессов прибрежной зоны, поскольку при тщательной валидации модель способствует детальному описанию волнового климата и выделению основных особенностей волнового поля.

Дальневосточные моря богаты разнообразными природными ресурсами, как минеральными, так и биологическими, являются благоприятной средой для реализации сценария активной генерации внутренних волн при трансформации баротропного прилива. Так, например, в водах Охотского моря выделяются четыре слоя [7, 8], а прилив в нем имеет сложную структуру, с преобладанием как суточных, так и полусуточных компонент в разных областях моря, при этом скорости приливных течений изменяются от нескольких сантиметров до 4 м/с в Курильских проливах. Стоит отметить, что динамика длинноволновых процессов, особенно на северо-восточном шельфе о. Сахалин, определяется в первую очередь особенностями приливного режима, который носит труднообъяснимый характер [9]. Целью настоящей работы является исследование с помощью математического моделирования характерных региональных особенностей поля внутренних волн на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Эта область Охотского имеет особое стратегическое и экономическое значение для России.

**Математическая модель.** Регионы шельфа с изменчивой морфометрией, резким перепадом глубин, необходимостью учета приливного воздействия должны являться объектом негидростатического полнонелинейного моделирования, поскольку имеют элементы

интенсивной динамики с выраженным вертикальным движением. Несмотря на то, что уже существуют немногочисленные работы по трехмерному негидростатическому моделированию (см., например, [10–12]), расчеты в масштабах шельфовой зоны в каком-либо регионе пока не проводились в Российской Федерации российскими исследователями. Для численного моделирования использовалась полнонелинейная модель, основанная на системе уравнений гидродинамики невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости в приближении Буссинеска для вертикальной плоскости — разреза, перпендикулярного изобатам прибрежной зоны (более подробное описание можно найти в работе [13, 14]). На поверхности моря задавалось приближение «твердой крышки». Граничное условие на дне ставилось как условие непротекания. Правая и левая границы являлись открытыми, на глубоководной границе задавался приливный форсинг. Амплитуды и фазы многокомпонентного прилива ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $Q_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $K_1$ ) определялись из модели TPXO 8 (A TOPEX/Poseidon Global Tidal Model), основанной на данных спутниковой альтиметрии [15]. Поскольку в модели TPXO отдельно определяются амплитуды и фазы для зональной и меридиональной компонент скорости приливной волны, то находилась проекция обеих компонент на направление разреза. Усредненная топография дна параметризовалась с помощью полиномиальных функций, горизонтально-однородное поле плотности морской воды – в виде суперпозиции экспоненциальных функций, коэффициенты которых были найдены на основе климатологического атласа WOA18.

**Трансформация бароклинных приливных волны на северо-восточном шельфе о. Сахалин.** Сложный характер приливных течений, скорости которых выступают в качестве баротропного форсинга на глубоководной границе в численной модели гидродинамики, препятствует выделению одного, преобладающего, направления распространения длинной волны по направлению к шельфу. Поэтому было решено рассматривать несколько направлений почти перпендикулярных изобатам. Еще одним критерием выбора расположения разрезов является условная «цилиндричность» среды в окрестности моделируемой секции. Для данного исследования на всем северо-восточном побережье Сахалина были выделены секции для проведения численных расчетов.

Перейдем теперь к обсуждению результатов моделирования на примере одной группы разрезов. Так, например, интерес представляют секции, имеющие общую точку на северо-восточном шельфе о. Сахалин вблизи залива Пильтун, а в глубоководной зоне выходящие из котловины Дерюгина. Они проходят через нефтегазоконденсатное месторождение Пильтун-Астохское и Одопту-море. Как отмечается в статье [16], акватория месторождения находится в зоне транзита осадочного материала: в этой части шельфа на дне выявлены подводные гряды с подвижными мезоформами рельефа дна – песчаными дюнами амплитудой 1–4 м. По результатам численного моделирования во всех разрезах этой группы происходит генерация интенсивных короткопериодных внутренних волн при трансформации бароклинного прилива; качественно динамическая картина для них имеет много общих характерных особенностей, по-видимому, связанных с достаточно похожим строением рельефа дна и профиля плотности. Для разрезов этой группы наблюдается сложная многомодовая динамика внутренних волн. Продемонстрируем некоторые особенности вертикальной структуры волновых полей на снимках, сделанных уже в установившемся режиме волнения. Так на рис. 1 представлены характерные поля горизонтальной скорости для двух соседних разрезов через 37 ч от начала моделирования. Как видно из рис. 1 бароклинная компонента существенно влияет на распределение придонных и приповерхностных скоростей, само поле скорости имеет сложную пространственную структуру. На рис. 2 представлены графики взаимнокорреляционных функций со сдвигом по пространству (для интервала времени от 15 до 38 ч) и со сдвигом по времени (для  $x$  от 10 до 80 км и для интервала времени от 15 до 38 ч) для изопикн, расположенных в невозмущенном состоянии на глубине 30 и 100 м. На графике слева видно, что максимальное значение коэффициента корреляции достигается для изопикн 30 и 100 м при сдвиге по пространству порядка 5–10 км. По времени также для изопикн 30 и 100 м максимальная взаимная корреляция в мелководной зоне достигается при сдвиге от часа до нескольких часов, тогда как в глубоководной зоне хорошо коррелируют не сдвинутые друг относительно друга изопикны. Таким образом, для исследуемого региона характерна принципиальная многомодовость и сложная пространственная структура волновых полей по типу динамики волновых пучков («beams»).

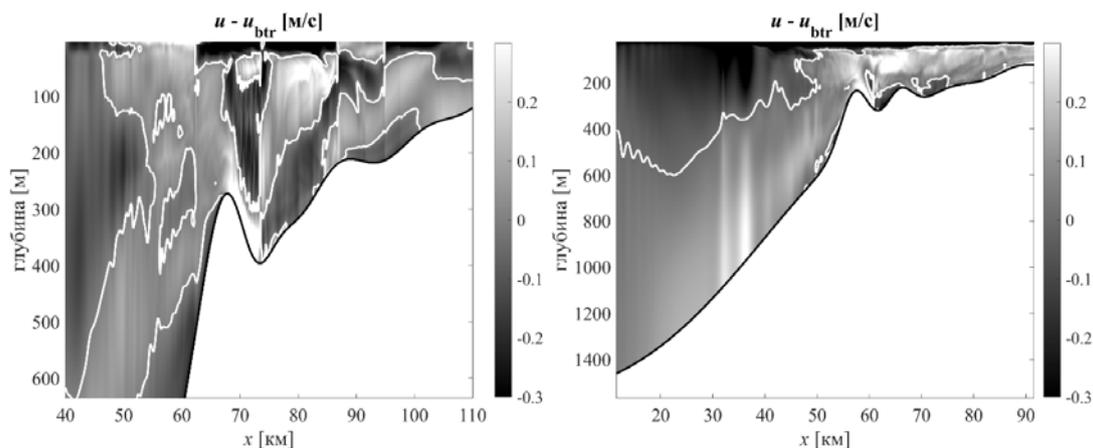


Рис. 1. Характерные особенности пространственной структуры поля горизонтальной скорости в установившемся режиме волнения (через 37 ч от начала моделирования) для двух разрезов.

Белая линия — линия нулевой скорости.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

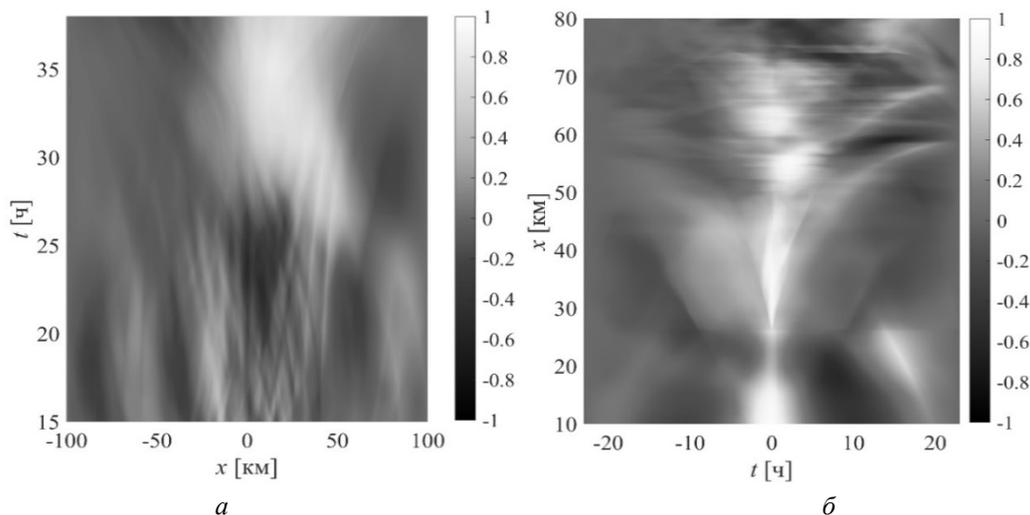


Рис. 2. Значения взаимнокорреляционной функции для одного из разрезов: взаимная корреляция изопикн, расположенных в невозмущенном состоянии на глубине 30 м и 100 м со сдвигом по координате  $x$  (а), со сдвигом по времени  $t$  (б).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

В настоящей работе были исследованы особенности течений, индуцированных сильно нелинейными внутренними волнами, образующимися при трансформации бароклинного прилива на шельфе, что может быть полезно для приложений, связанных в том числе с гидроакустикой. Продемонстрированы эффекты характерной для всего северо-восточного шельфа многомодовости. Полученные результаты могут быть использованы для создания карт распределения амплитуд внутренних приливов вдоль исследуемого побережья о. Сахалин.

*Литература*

1. Куртепов В. М. Влияние внутренних волн, волн Россби, мезомасштабных вихрей и течений на распространение звука в океане // *Акустика океана. Современное состояние* / Под ред. Л. М. Бреховских, И. Б. Андреевой. М.: Наука, 1982. С. 36–52.
2. Lin Y.-T., Duda T. F., Lynch J. F. Acoustic mode radiation from the termination of a truncated nonlinear internal gravity wave duct in a shallow ocean area // *J. Acoust. Soc. Am.* 209. Vol. 126. P. 1752–1765.
3. McMahon K. G., Reilly-Raska L. K., Siegmann W. L., Lynch J. F., Duda T. F. Horizontal Lloyd mirror patterns from straight and curved nonlinear internal waves // *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. Vol. 131. P. 1689–1700.
4. Emerson C., Lynch J. F., Abbot P., Lin Y.-T., Duda T. F., Gawarkiewicz G. G., Chen C.-F. Acoustic propagation uncertainty and probabilistic prediction of sonar system performance in the southern East China Sea continental shelf and shelfbreak environments // *IEEE J. Oceanic Eng.* 2015. Vol. 40. P. 1003–1017.
5. Rutenko A. N. The influence of internal waves on losses during sound propagation on a shelf // *Acoustical Physics*. 2010. Vol.56. P. 703–713.
6. Есипов И. Б., Кенигсбергер Г. В., Попов О. Е., Поддубняк В. Я., Солдатов Г. В., Михеев В. И. Горизонтальная рефракция акустического сигнала на шельфе и в береговом клине Черного моря // *Изв. РАН. Серия физическая*. 2020. Т. 84, № 6. С. 833–838.
7. Морощкин К. В. Водные массы Охотского моря. М.: Наука, 1966.
8. Круц А. А., Лучин В. А. Вертикальная структура толщи вод Охотского моря // *Изв. ТИНРО*. 2013. Т. 175. С. 234–253.
9. Деева Р. А. Каталог гармонических и негармонических постоянных приливов отечественных вод морей Дальнего Востока. Л.: Гидрометеиздат, 1972.
10. Vlasenko V., Stashchuk N., Inall M., Hopkins J. Tidal energy conversion in a global hot spot: On the 3-D dynamics of baroclinic tides at the Celtic Sea shelf break // *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2014. Vol. 119. DOI: 10.1002/2013JC009708.
11. Vlasenko V., Stashchuk N., Nimmo-Smith W. A. M. Three-dimensional dynamics of baroclinic tides over a seamount // *J. of Geophysical Research*. 2018. Vol. 123, № 2. P. 1263–1285.
12. Zeng Z., Brandt P., Lamb K., Greatbatch R., Dengler M., Claus M., Chen X. Three Dimensional Numerical Simulations of Internal Tides in the Angolan Upwelling Region // *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2021. Vol. 126. DOI: 10.1029/2020JC016460.
13. Lamb K. Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge // *J. Geoph. Res.* 1994. Vol. 99, № C1. P. 843–864.
14. Рувинская Е. А., Куркина О. Е., Куркин А. А. Перенос частиц и динамические эффекты при трансформации бароклинной приливной волны в условиях шельфа дальневосточных морей // *Экологические системы и приборы*. 2021. № 11. С. 109–118.
15. Egbert G.D., Erofeeva S.Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2002. Vol. 19, № 2. P. 183–204.
16. Лапотников А. Г., Котельников А. С., Аппо Й. К. Геологическое строение, перспективы нефтегазоносности и проект разведочного бурения на месторождении Пильтун-Астохское // *Булатовские чтения*. 2018. С. 153–165.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2020-0007 «Волновой климат стратифицированного морского шельфа: нелинейные динамические процессы и их влияние на прибрежную зону и гидротехнические сооружения») и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-70.2022.1.5.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОТОКА СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ НАД ПОПЕРЕЧНО НЕОДНОРОДНЫМ ДНОМ

О. Д. Шишкина, канд. техн. наук

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

## INVESTIGATION OF KINEMATICS OF FLOW OF STRATIFIED FLUID OVER TRANSVERSELY INHOMOGENEOUS BOTTOM

O. D. Shishkina, Ph.D.

Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

*На основе данных натурных измерений и дистанционного зондирования параметров вдольбереговых течений в различных зонах акватории Каспийского моря определены критические параметры процесса интенсивного взаимодействия потока стратифицированной жидкости с твердым поперечно неоднородным дном ступенчатого типа.*

*The critical parameters of the process of intensive interaction of a stratified liquid flow with a solid transversely inhomogeneous bottom of a stepped type are determined on the basis of field measurements and remote sensing data of the parameters of alongshore currents in different zones of the Caspian Sea.*

**Введение.** На примере проведенных ранее исследований внутреннего волнообразования в южной части Каспийского моря (рис. 1, а) были выявлены особенности трансформации линейных и нелинейных внутренних волн над неоднородным дном в прибрежной зоне [1]. Рельеф дна ступенчатого типа, ориентированный поперек направления распространения внутренних волн, в различных сезонных условиях может являться источником генерации как нелинейных волн (солитонов), так и линейных внутренних волн с типичной вертикальной модовой структурой (рис. 1, б). Во втором случае в цуге внутренних волн проявляются дисперсионные свойства отдельных мод, выраженные в их пространственно-временной независимости [2, 3].

Целью данной работы является исследование особенностей влияния линейных и нелинейных краевых внутренних волн на гидродинамику прибрежной зоны.

**Анализ гидрологических параметров.** Для выявления причин наблюдаемой трансформации вертикальной структуры поля внутренних волн в прибрежном районе юго-западной части Каспийского моря был проведен анализ изменения вертикального профиля температуры воды и соответствующего ей профиля частоты Брента-Вяйсяля за период натурных наблюдений.

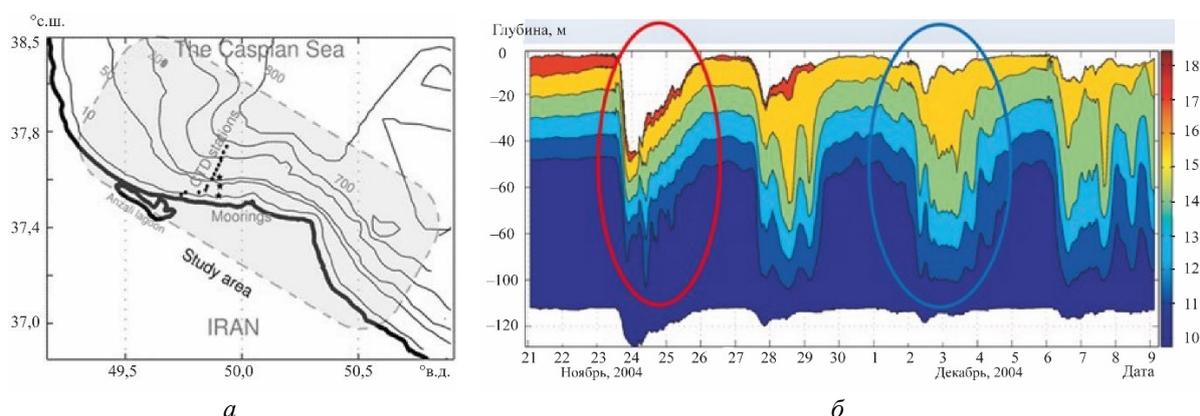


Рис. 1. Наблюдение внутренних волн в юго-западной части Каспийского моря [4].

а — область натурных исследований; б — вариации температуры по времени.

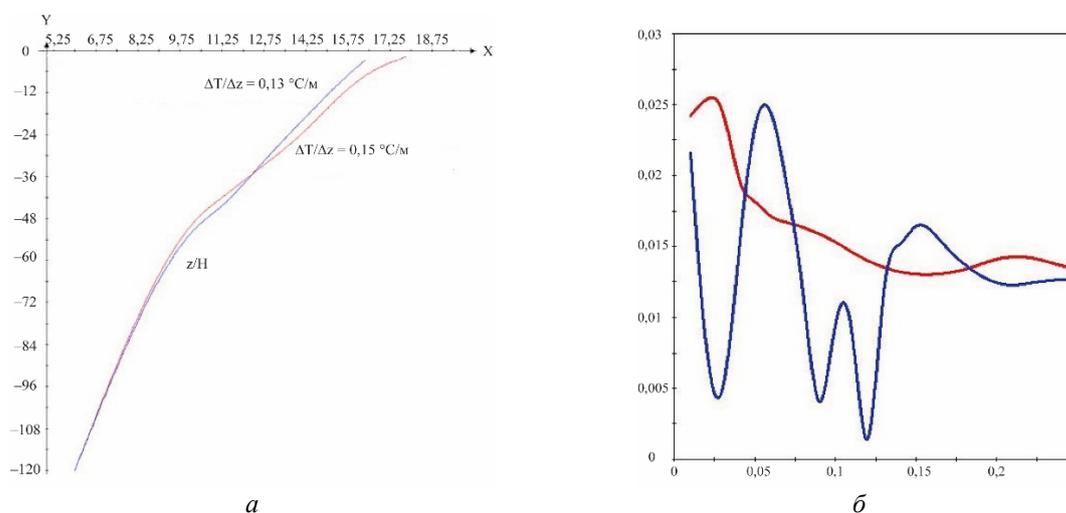


Рис. 2. Зависимость гидрологических параметров от глубины на полигоне в юго-западной части Каспийского моря в ноябре и декабре 2004 г.

*a* — температура; *б* — частота Брента-Вяйсяля; цвет линий соответствует цвету выделенных участков на рис. 1, *б*.

Результаты исследований, представленные на рис. 2, показали, что в ноябре-декабре 2004 года в приповерхностных слоях воды в пределах сезонного пикноклина произошло незначительное снижение градиента температуры с  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  до  $\Delta T = 13^\circ\text{C}$  (рис. 2, *a*). Однако, данные вариации температурного профиля вызвали кардинальное изменение вертикальной структуры профиля частоты Брента-Вяйсяля (рис. 2, *б*).

В частности, если в ноябре 2004 г., приповерхностный слой с единственным максимумом частоты можно оценивать как практически двуслойный (красная линия на рис. 2, *б*), то в декабре того же года по всей толщине сезонного пикноклина были распределены три пика частоты Брента-Вяйсяля (синяя линия на рис. 2, *б*).

Такая перестройка профиля частоты плавучести явилась причиной изменения характера наблюдаемой вертикальной структуры внутренних волн. Очевидно, что произошла трансформация от выраженного нелинейного бездисперсионного профиля одиночного солитона к типично линейному периодическому профилю с модовой структурой и проявлением дисперсии в виде пространственно-временной независимости низших мод вследствие разности их фазовых скоростей  $C_i$  ( $i$  — номер моды).

**Оценка кинематических параметров.** Для юго-западной части Каспийского моря по данным характерных скоростей линейных и нелинейных внутренних волн [4] выполнена оценка их соответствия расчетам, основанным на спутниковых данных [1].

Полученные в [4] расчетные значения для фазовых скоростей двух низших мод линейных внутренних волн  $C_1$  и  $C_2$  (табл. 1) показали двукратное превышение данных контактных измерений относительно расчетов, основанных на данных дистанционного зондирования поверхности со спутника MODIS-Aqua [1]. Такое двукратное расхождение контактных и дистанционных замеров характерно для измерений скорости диспергирующих линейных волн.

Таблица 1

Оценка параметров линейных внутренних волн по данным контактных замеров и дистанционного зондирования 2 декабря 2004 г. (рис. 1, *б*)

|                                  | Спутниковые данные [1]                                | Натурные данные [4]                                                       |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Длина волны 1-й моды $\lambda_1$ | $\cos 37,7^\circ * 111,111 * 0,3^\circ = 26,374$ км   | $C_1 * T_1 = 1,2 \text{ м/с} * 12 \text{ ч} * 3600 \text{ с} = 51,48$ км  |
| Длина волны 2-й моды $\lambda_2$ | $\cos 37,78^\circ * 111,111 * 0,35^\circ = 30,737$ км | $C_2 * T_2 = 0,45 \text{ м/с} * 36 \text{ ч} * 3600 \text{ с} = 58,32$ км |

Результаты аналогичных сравнительных расчетов для нелинейных внутренних волн, вследствие их бездисперсионного распространения, показали хорошее совпадение с погрешностью 2,7 % (табл. 2). Расчетная скорость  $C$  при определении характерной длины нелинейной волны принималась равной значению скорости дрейфа Стокса на поверхности [4].

Таблица 2

Оценка параметров нелинейных внутренних волн по данным контактных замеров и дистанционного зондирования 24 ноября 2004 г. (рис. 1, б)

|             | Спутниковые данные [1]                               | Натурные данные [4]                            |
|-------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Длина волны | $\cos 37,75^\circ * 111,111 * 0,2^\circ = 17,571$ км | $C * T = 0,07$ м/с * 72 ч * 3600 с = 18,144 км |

Результаты натуральных наблюдений в юго-восточной части Каспийского моря (рис. 3, а) [5] показали отсутствие постоянно наблюдаемой корреляции между направлением и скоростью ветра в приводном слое и направлением и скоростью течения в приповерхностном слое (рис. 3, б). Что свидетельствует о действии иных движущих сил при формировании наблюдаемого сдвигового потока в прибрежной зоне (рис. 3, в). Для определения предпосылок данного явления была выполнена количественная оценка соотношения высоты краевой нелинейной внутренней волны (рис. 1, б) и параметров гидрологии в зоне наблюдения (рис. 3, а, б).

Ранее на двуслойной модели приповерхностного слоя океана автором было показано [6–8], что соотношения высоты краевой нелинейной внутренней волны  $\eta$  и толщин нижнего и верхнего квазиоднородных слоев  $h_1$  и  $h_2$  являются определяющими для режима взаимодействия краевых внутренних волн с прибрежной частью акватории. В частности, формирование в мелководной зоне возмущения в форме сдвигового потока возможно при наличии конкретных соотношениях указанных выше параметров.

Гидрологические характеристики района наблюдений оценивались по модели двуслойной жидкости для профиля дна ступенчатого типа. Глубина мелководной части прибрежной зоны  $H_S = h_{2S} + h_1 = 50$  м, где  $h_{2S}$  и  $h_1$  — толщины нижнего и верхнего слоев соответственно. Общая глубина глубоководной части акватории  $H = h_1 + h_2 = 1000$  м, где  $h_2$  — толщина нижнего однородного слоя.

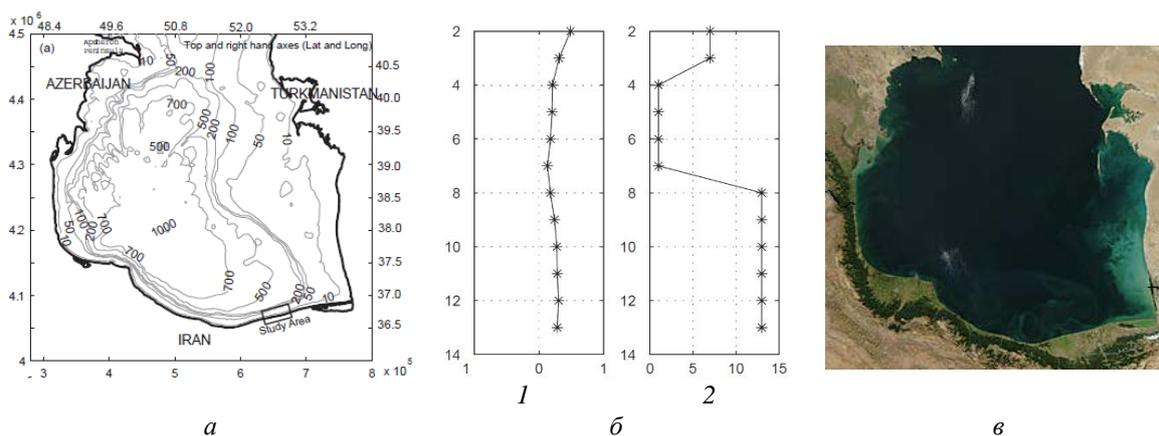


Рис. 3. Район наблюдений в юго-западной части Каспийского моря [5].

$a$  — область натуральных исследований;  $b$  — коэффициенты корреляции (1) и временной сдвиг между скоростью ветра ( $U_{10}$ ) и поперечной компонентой скорости потока жидкости (2);  $v$  — изображение юго-восточная часть Каспийского моря со спутника MODIS-Aqua: 30.09.2004 г.  
[https://parstime.ipower.com/spaceimages/caucasus\\_caspian.html](https://parstime.ipower.com/spaceimages/caucasus_caspian.html).

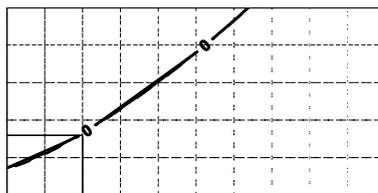


Рис. 4. График решения уравнения (1) для гидрологических параметров района наблюдений в юго-восточной части Каспийского моря (рис. 3, а, б) [5].

Так как  $H \gg H_s$ , расчет производился по соответствующей формуле для случая бесконечно глубокого нижнего слоя жидкости [6]:

$$\frac{3}{8h_1}\eta^2 + \eta - h_{2s}\sqrt{\frac{h_{2s}}{H_s}} = 0. \quad (1)$$

Результаты расчета критической толщины верхнего однородного слоя, при котором формируется сдвиговый поток в мелкой части прибрежной зоны, представлены на рис. 4.

Получено хорошее совпадение расчетных данных  $h_1^* = 7,9$  м с данными натуральных измерений толщины приповерхностного слоя  $h_1 = 7-8$  м (рис. 3, б) [5] и высоты краевой внутренней волны  $\eta = -40$  м (рис. 1, б) [4].

**Закключение.** Проведенные исследования показали, что кинематические особенности движения жидкости, наблюдаемые в прибрежных районах южной части Каспийского моря, в значительной степени определяются соотношением параметров краевых внутренних волн и сезонной гидрологии исследуемых районов. При этом вариации градиента плотности в пределах сезонного пикноклина существенно влияют на характер гидродинамики прибрежной зоны при воздействии переменного ветрового поля.

#### *Литература*

1. Шишкина О. Д., Литвин А. Д., Стецюк И. В. Оценка линейных и нелинейных параметров внутренних волн в шельфовой зоне Каспийского моря по данным контактных и дистанционных измерений // Тр. конф. 2018. С. 406–409. DOI: 10.29006/978-5-9901449-4-1-2018-113.
2. Shishkina O. D. Resonant generation of solitary wave in thermocline // Exp. Fluids. 1996. Vol. 21, Iss. 5. P. 374–379. DOI: 10.1007/BF00189058.
3. Шишкина О. Д. Экспериментальное исследование генерации внутренних волн вертикальным цилиндром в приповерхностном пикноклине // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2002. № 6. С. 94–99. DOI: 10.1023/A:1022356531179.
4. Weber J. E. H., Ghaffari P. Mass transport in internal coastal Kelvin waves // Eur. J. Mech. -B/Fluids. 2014. Vol. 47. P. 151–157.
5. Ghaffari P., Chegini V. Acoustic Doppler Current Profiler observations in the southern Caspian Sea: shelf currents and flow field off Feridoonkenar Bay, Iran // Ocean Sci. 2010. Vol. 6. P. 737–748. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2014.02.006.
6. Shishkina O. D., Sveen J. K., Grue J. Transformation of internal solitary waves at the “deep” and shallow” shelf: satellite observations and laboratory experiment // Nonlinear Proc. Geoph. 2013. Vol. 20, № 5. P. 743–757. DOI: 10.5194/npg-20-743-2013.
7. Шишкина О. Д. Определение условий трехмерной трансформации нелинейных внутренних волн по типу «мелкого» и «глубокого» шельфа: теория, натурные наблюдения, эксперимент // Тр. конф. 2016. С. 177–180.
8. Шишкина О. Д. Линейные и нелинейные механизмы пространственной трансформации внутренних волн на шельфе с горизонтальным и наклонным дном. // Тр. конф. 2019. С. 995–999.

Работа автора финансируется из средств государственного задания (программа № FFUF-2021-0007).

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХОДА ГРЯЗЕВОГО ОПОЛЗНЯ В ВОДНЫЙ БАССЕЙН

Ю. Н. Захаров<sup>1,2</sup>, д-р физ.-мат. наук, А. И. Зимин<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук, М. Е. Яшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ГОУ ВПО Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

## NUMERICAL SIMULATION OF MUD LANDSLIDE DESCENT INTO A WATER BASIN

Y. N. Zakharov<sup>1,2</sup>, Dr.Sc., A. I. Zimin<sup>1,2</sup>, Ph.D., M. E. Yashin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

<sup>2</sup>Federal Research Center for Information and Computing Technologies, Novosibirsk, Russia

*В работе рассматривается математическое моделирование схода грязевого оползня в воду. Эта модель описывается трёхкомпонентной системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса с переменной вязкостью и плотностью. Приводятся результаты численных расчётов о сходе лавины в Богучанское водохранилище.*

*The paper considers mathematical modeling of the descent of a mud landslide into water. This model is described by a three-component system of Navier-Stokes differential equations with variable viscosity and density. The results of numerical calculations of the avalanche descending into the Boguchanskoye reservoir are presented.*

**Введение.** Горные оползни и сели могут представлять опасность для близлежащих инфраструктурных и природных объектов. Для предотвращения или смягчения последствий необходимо проводить комплексное исследование условий, факторов и предпосылок возникновения оползней. Примером крупного оползня может служить оползень, который сошел в долине реки Бурей 11 декабря 2018 г. и привел к возникновению цунами в водохранилище Бурейской ГЭС [1]. Он перекрыл высокой каменной плотиной заполненное водохранилищем русло р. Бурей, а вызванная им волна на большой площади уничтожила лес.

В настоящее время имеются различные математические модели для моделирования селевых и оползневых процессов. В работе [2] приводится следующая классификация моделей с учетом специфики представления в модели механизма селевого или склонового процесса: непрерывные модели, клеточные автоматы и дискретные модели. В основе непрерывных моделей лежат уравнения непрерывности и движения вязкой жидкости в виде уравнения Навье-Стокса или в ее интегрированной по глубине гидравлической форме — уравнений движения Сен-Венана [3]. Клеточные автоматы представляют движение потока вещества как закономерную смену состояний пространственных ячеек в направлении движения потока. То есть процесс представляется не в виде изменения физических величин, а как закономерная последовательной смены состояний пространственных ячеек заданной формы и размера [4]. Дискретные модели представляют движение потока вещества в виде движения совокупности отдельных структурных частиц. В основе дискретных моделей лежит уравнение движения структурных частиц – материальных точек или твердых тел, получаемое непосредственно из второго закона Ньютона [2, 5].

В данной работе рассматривается задача моделирования схода оползня в долине реки Бурей при помощи модели трехкомпонентной вязкой несжимаемой жидкости [6–9].

**Математическая модель и численная схема решения.** Вход оползня с берега в водоём будем моделировать как движение трёхкомпонентной вязкой жидкости с переменной плотностью и вязкостью. Каждая из таких компонент представляется вязкой несжимаемой жидкостью с собственными значениями вязкости и плотности, при этом предполагается возможность диффузии массы между этими компонентами. Движение этой трёхкомпонентной среды описывается системой уравнений Навье-Стокса с нелинейной вязкостью. Компонента с наибольшей вязкостью и плотностью описывает движением намокший связный грунт (оползень), с меньшими плотностями и вязкостями — воду и воздух [7].

Система уравнений имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\rho \bar{V})}{dt} = -\nabla p + \operatorname{div}(\mu \mathbf{D}) + \rho \bar{f}, \\ \operatorname{div} \bar{V} = 0, \\ \frac{dC_1}{dt} = D_{12} \Delta C_1, \\ \frac{dC_3}{dt} = D_{23} \Delta C_3, \\ C_2 = 1 - C_1 - C_3, \\ \mu = \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{\mu_2 \mu_3 C_1 + \mu_1 \mu_3 C_2 + \mu_1 \mu_2 C_3}, \\ \rho = \rho_1 C_1 + \rho_2 C_2 + \rho_3 C_3, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\bar{V}(\bar{x}, t) = (v_1, v_2, v_3)$  — вектор скорости среды в точке  $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3)$  и момент времени  $t$ ;  $\mu(\bar{x}, t)$  — динамическая вязкость;  $\rho(\bar{x}, t)$  — плотность,  $C_1(\bar{x}, t)$ ,  $C_2(\bar{x}, t)$ ,  $C_3(\bar{x}, t)$  — объемные концентрации компонент с постоянными плотностями  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  и вязкостями  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$ ;  $\bar{f} = (f_1, f_2, f_3)$  — вектор массовых сил;  $p$  — давление;  $\mathbf{D}$  — тензор скоростей деформаций, компоненты которого равны  $\tau_{ij} = \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $D_{12} = \text{const}$  — коэффициент диффузии между

первой и второй компонентой;  $D_{23} = \text{const}$  — коэффициент диффузии между второй и третьей компонентой.

Для решения системы уравнений (1) используются разностные схемы расщепления по физическим факторам [10] с учетом переменной плотности на неравномерной прямоугольной сетке с шахматным расположением узлов. При этом счёт происходит сквозным образом без явного выделения границ между компонентами. Более полное описание этого численного алгоритма представлено в [7].

**Постановка задачи.** Рассматривается двухмерная задача о движении оползня на склоне р. Бурея. В качестве области решения используется поперечный профиль склона, реки и противоположного берега [1]. На рис. 1 изображена схема области решения, показаны форма оползня и расположение воды, а также обозначены границы. Здесь  $\Gamma_1$  — твердая граница, соответствует поверхности склона, на ней выполняется условие прилипания

$$v_1|_{\Gamma_1} = 0, \quad v_2|_{\Gamma_1} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial n}|_{\Gamma_1} = 0, \quad \frac{\partial C_1}{\partial n}|_{\Gamma_1} = 0, \quad \frac{\partial C_3}{\partial n}|_{\Gamma_1} = 0;$$

$\Gamma_2$  — граница свободного вытекания, на которой действует атмосферное давление

$$\frac{\partial v_1}{\partial y}|_{\Gamma_2} = 0, \quad \frac{\partial v_2}{\partial y}|_{\Gamma_2} = 0, \quad p|_{\Gamma_2} = 101325 \text{ Па}, \quad \frac{\partial C_1}{\partial y}|_{\Gamma_2} = 0, \quad \frac{\partial C_3}{\partial y}|_{\Gamma_2} = 0.$$

Для компонент среды использовались следующие значения плотностей и вязкостей:

$$\rho_1 = 1,0 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_2 = 1000,0 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \rho_3 = 1950,0 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \mu_1 = 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}; \quad \mu_2 = 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}; \quad \mu_3 = 10,0 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}.$$

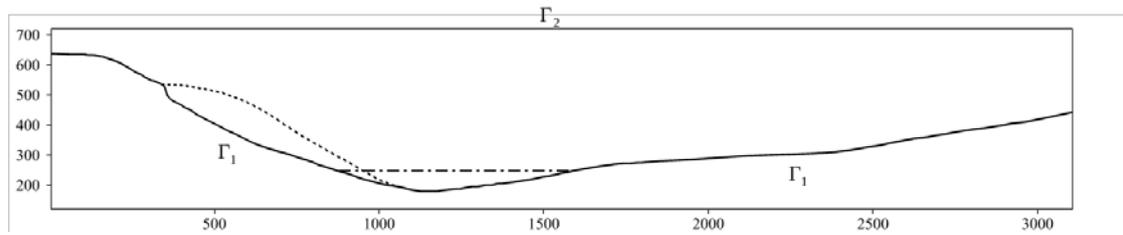


Рис. 1. Схема области склона.

Пунктирная линия — профиль оползня в начальный момент времени;  
штрихпунктирная — уровень водоема; сплошная — профиль склона.

**Анализ результатов.** На рис. 2 представлена картина схода оползня, заполняющего собой русло реки и выталкивающее на берег большую массу воды. Волна доходит до отметки 2400 м по горизонтали и 312 м по вертикали (см. рис. 2), что соответствует ее продвижению примерно на 1 км вверх по склону, что согласуется с натурными данными, представленными в [1].

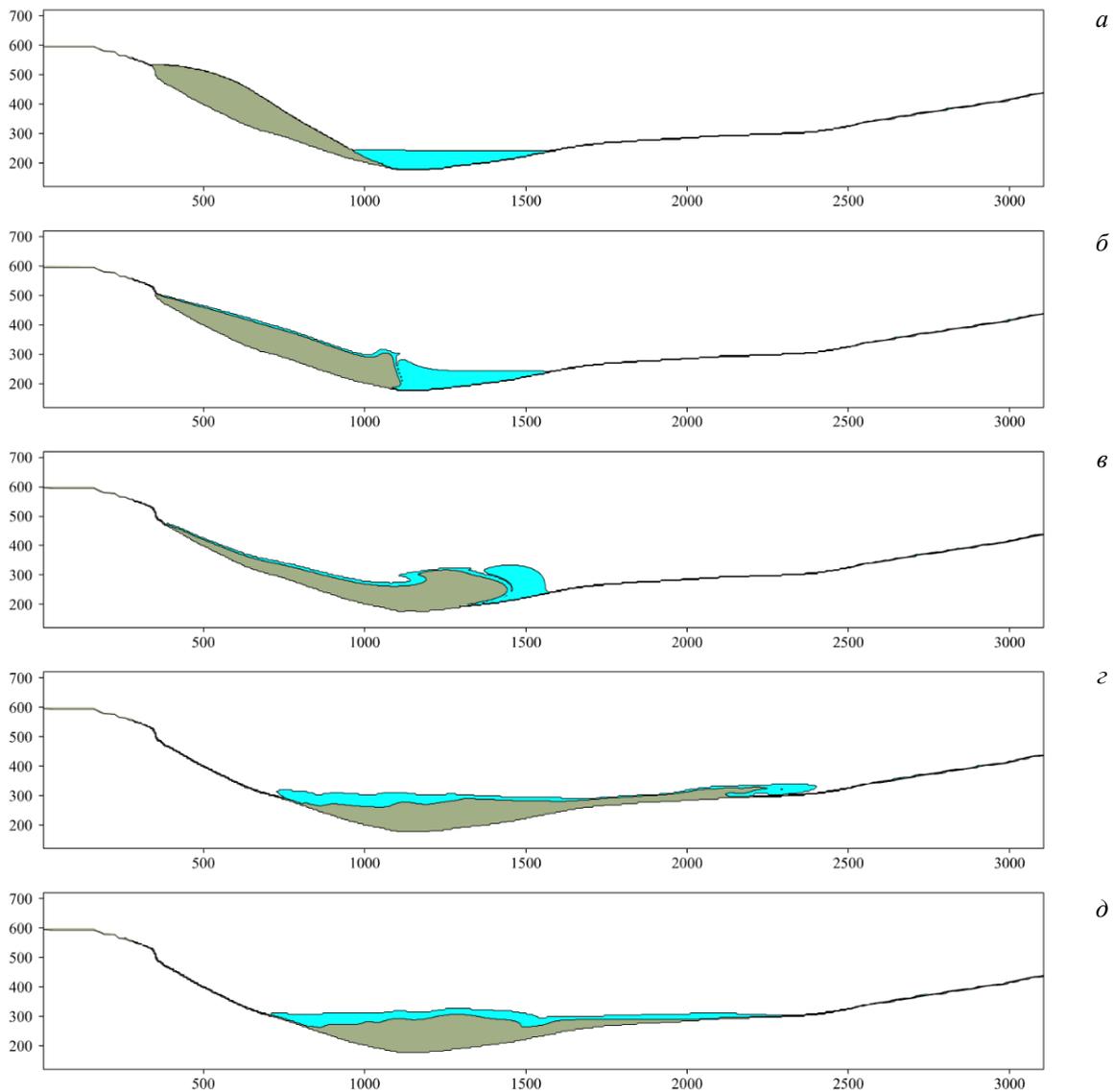


Рис. 2. Сход оползня на моменты времени (в секундах).

*a* — 0 с; *б* — 10 с; *в* — 20 с; *г* — 80 с; *д* — 100 с.

**Заключение.** Из проделанных расчётов можно сделать следующие выводы:

1) для моделирования схода сухого оползня в водный бассейн можно использовать гидродинамическую трёхкомпонентную модель с переменными вязкостью и плотностью (1), так как эта модель позволила проследить процессы движения оползня, образования волны и ее заплеск на берег;

2) по данным аэровизуальных наблюдений последствий схода оползня, согласно которым волна продвинулась вверх по склону почти на 1 км, достигнув высоты около 56 м над уровнем воды в водохранилище [1].

Наши расчёты показали, что отличие полученных результатов по заплеску на берег и величины возвышения волны над первоначальным уровнем не превышает 15%. Такое небольшое отличие натуральных измерений и результатов численных расчётов мы можем объяснить двумя факторами. Во-первых, натурные данные получены из аэровизуальных наблюдений, а они могут быть не точными, так как определялись по вывалу леса на противоположном склоне Бурейского водохранилища. Во-вторых, сам характер схода оползня близок к двумерному процессу, так как сошедшая скальная порода не была протяжённой по ширине.

#### *Литература*

1. Махинов А. Н. Крупный оползень в долине реки Буряя и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС / Под ред. А. Н. Махинов, В. Ким, А. В. Остроухов, Д. В. Матвеев // Вест. ДВО РАН. 2019. – № 2(204). С. 35–44.
2. Михайлов В. О. Математическое моделирование селей, обвалов и оползней / Под ред. В. О. Михайлов, С. С. Черноморец. 2011. 131 с.
3. Sheridan M. F. Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington / Ed. M. F. Sheridan, A. J. Stinton, A. Patra, E. B. Pitman, A. Bauer, C. C. Nichita // J. of Volcanology and Geothermal Research. 2005. Vol. 139, № 1–2. P. 89–102.
4. Dattilo G. Simulation of a cellular landslide model with CAMELOT on high performance computers / G. Dattilo, G. Spezzano // Parallel Computing. 2003. Vol. 29, № 10. P. 1403–1418.
5. Hadjigeorgiou J. Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model / Ed. J. Hadjigeorgiou, K. Esmaili, M. Grenon // Tunnelling and Underground Space Technology. 2009. Vol. 24. № 3. P. 296–308.
6. Zakharov Y. Two-Component Incompressible Fluid Model for Simulating Surface Wave Propagation / Ed. Y. Zakharov, A. Zimin, V. V. Ragulin // Abstracts of International Conference «Computational and Informational Technologies in Science, Engineering and Education». Almaty, Kazakhstan, 2015. P. 178.
7. Zakharov Y. N. Numerical simulation of surface waves arising from underwater landslide movement / Y. N. Zakharov, A. I. Zimin // Conf. Proc. «Mathematical and Information Technologies MIT-2016». 2017. P. 535–546.
8. Zakharov Y. N. Mathematical modeling of a hydraulic flume for carrying out numerical experiments on coastal waves and erosion of cohesive soil / Ed. Y. N. Zakharov, A. I. Zimin, I. S. Nudner, M. E. Yashin // J. of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441, №. 1. P. 012182.
9. Семенов К. К. Лабораторные и численные исследования профиля волн цунами, распространяющихся по ровному дну / Под ред. К. К. Семенов, И. С. Нуднер, В. В. Лебедев, Ю. Н. Захаров, А. И. Зимин, С. В. Стуколов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. № 4. С. 5–15.
10. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред / Под ред. О. М. Белоцерковский. М.: Наука, 1984. 520 с.

## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПРИЛИВНОГО (ВОЛНА $M_2$ ) ДИАПИКНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

*E. V. Sofina*<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук, *B. A. Kagan*<sup>1</sup> д-р физ.-мат. наук, *A. A. Timofeev*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

## PARAMETRIZATION OF TIDAL ( $M_2$ WAVE) DIAPYCNAL MIXING IN REGIONAL CLIMATE SIMULATION OF THE LAPTEV SEA IN SUMMER PERIOD

*E. V. Sofina*<sup>1,2</sup>, Ph.D., *B. A. Kagan*<sup>1</sup> Dr.Sc., *A. A. Timofeev*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

*Предлагается способ учета индуцируемого внутренними приливными волнами диапикнического перемешивания, основанный на модельных оценках диссипации бароклинного прилива. Для воспроизведения динамики и энергетики бароклинного прилива (волна  $M_2$ ) в море Лаптевых привлекается трехмерная гидростатическая модель высокого разрешения. Нескорректированный и скорректированный (за счет приливной диапикнической диффузии) коэффициенты вертикального турбулентного перемешивания отличаются друг от друга на несколько порядков величины в локальных областях с выраженной приливной динамикой и изрезанным рельефом дна. Можно ожидать, что вклад эффектов внутренних приливных волн в формирование климата моря Лаптевых будет значимым наряду с другими климатообразующими факторами.*

*The method is proposed for taking into account the diapycnal mixing induced by internal tidal waves, based on model estimates of the baroclinic tide dissipation. To reproduce the dynamics and energy of the baroclinic tide ( $M_2$  wave) in the Laptev Sea, a high-resolution three-dimensional hydrostatic model is used. The uncorrected and corrected (due to tidal diapycnal diffusion) coefficients of vertical turbulent mixing differ from each other by several orders of magnitude in local areas with strong tidal dynamics and rough bottom topography. It can be expected that the contribution of the effects of internal tidal waves to the formation of the climate of the Laptev Sea will be significant along with other climate-forming factors.*

Микроструктурные измерения в море Лаптевых показали эпизодическое, коррелирующее с полусуточным приливом, усиление диссипации кинетической энергии турбулентности на шельфе и на континентальном склоне примерно на два порядка величины по сравнению с фоновыми значениями [1, 2]. Современные модели климата моря могут включать приливное воздействие, но их пространственного разрешения недостаточно для корректного воспроизведения внутренних приливных волн [3]. Считается, что даже при явном учете приливного форсинга, если пространственное разрешение недостаточно требуется дополнительная параметризация приливного диапикнического перемешивания, обусловленного эффектами внутренних приливных волн. Все существующие параметризации приливного перемешивания основаны на приближении «слабого взаимодействия», когда различие частот фоновой и приливной турбулентности велико и можно пренебречь нелинейным взаимодействием между ними. В этом случае влияние приливного диапикнического перемешивания учитывается путем сложения его с фоновым турбулентным перемешиванием. В большинстве параметризаций для определения коэффициента диапикнической диффузии используется формула Осборна

$$\kappa_\rho \approx 0.2 \langle -\dot{\varepsilon} / \rho \rangle N^{-2},$$

где  $\dot{\varepsilon}$  — локальная скорость диссипации бароклинной приливной энергии;  $\rho$  — средняя плотность морской воды;  $N$  — частота Брента-Вяйсяля; угловые скобки означают усреднение за приливный цикл. Основное различие заключается в определении диссипации бароклинной приливной энергии. Наиболее популярные параметризации предполагают, что диссипация бароклинной приливной энергии может быть описана орографическим сопротивлением, в этом случае аргументами для ее определения выступают диссипация баротропной приливной энергии и вертикальный масштаб вырождения, на котором диапикническая диффузия убывает по экспоненциальному закону с расстоянием от дна [4].

Мы предлагаем другой способ учета диапикнического перемешивания, основанный на непосредственных модельных оценках диссипации бароклинного прилива. Для этого была решена вспомогательная задача воспроизведения динамики бароклинного прилива (волна  $M_2$ ) в море Лаптевых с помощью трехмерной гидростатической модели высокого разрешения QUODDY-4 [5]. На рис. 1 представлено пространственное распределение коэффициента приливного диапикнического перемешивания в море Лаптевых. Максимальные значения диапикнической диффузии до  $10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$  приходятся на районы с выраженной приливной динамикой (Хатангский залив) и изрезанным рельефом дна (окрестности свала глубин, северо-западная часть моря) (рис. 1). Дополнительно был оценен вертикальный масштаб вырождения внутренних приливных волн, как расстояние от дна, где коэффициент диапикнической диффузии превышает  $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  (рис. 2). На шельфе масштаб вырождения равен 20–30 м, на континентальном склоне — 100–400 м, в глубоководной части моря — 50–100 м. Наблюдаемая пятнистая структура говорит в пользу предложенной параметризации приливного диапикнического перемешивания, в сравнении с параметризациями через орографическое сопротивление, в которых вертикальный масштаб вырождения задается постоянной величиной.

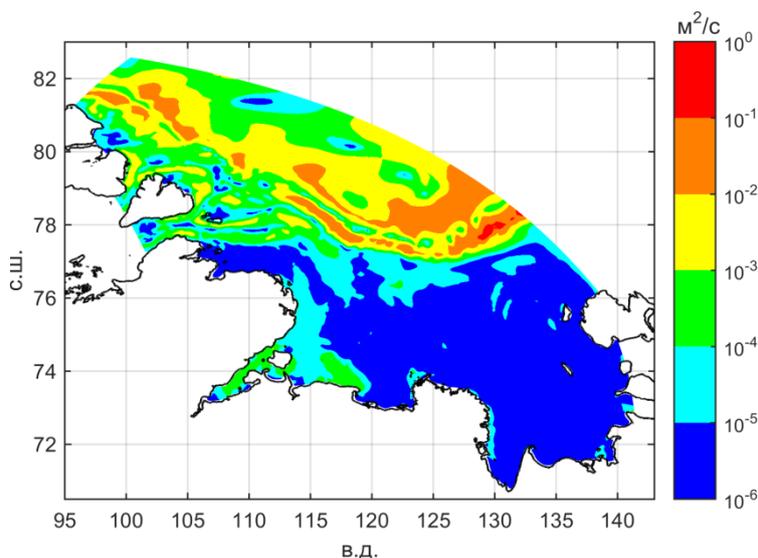


Рис. 1. Средний по глубине коэффициент приливной диапикнической диффузии.

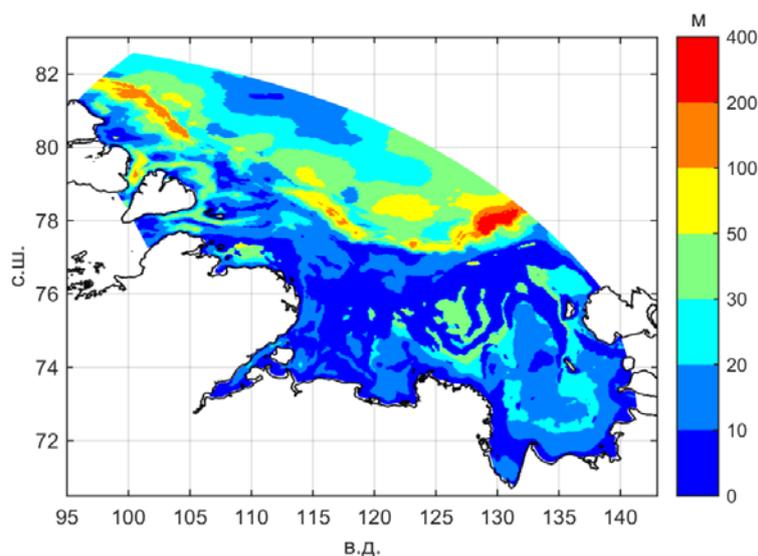


Рис. 2. Вертикального масштаб вырождения внутренних приливных волн.

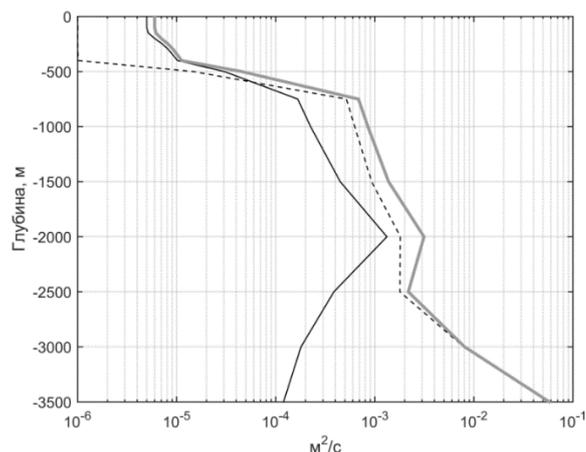


Рис. 3. Вертикальные профили средних (по площади моря) коэффициента приливной диапикнической диффузии (черный пунктир) и нескорректированного (черная линия) и скорректированного (серая линия), за счет приливной диапикнической диффузии, коэффициентов вертикального турбулентного перемешивания.

Для апробирования предложенной параметризации была выполнена серия численных экспериментов по установлению климата моря Лаптевых в летний период с учетом и без учета приливного диапикнического перемешивания. Горизонтальное разрешение конечно-элементной сетки принимается в среднем по площади моря равным 5 км. Использовалась отслеживающая топографию дна вертикальная координата, толщина моря делится на 40 слоев. Шаг по времени задается равным 24 с. Глубины заимствуются из архива ИВСаО. Поле ветра в приводном слое атмосферы берется из ERA-Interim реанализа атмосферных данных в Арктике. Значения уровня на открытой границе моря, необходимые для решения интегрального по глубине уравнения неразрывности, преобразованного к форме волнового уравнения, задаются по данным по данным CNES-CLS09 глобальной средней динамической топографии свободной поверхности моря, дополненной данными спутниковой альтиметрии и *in situ* измерений. Массообмен с атмосферой на свободной поверхности моря параметризуется т.н. восстанавливающими (restoring) граничными условиями, представляющими потоки массы пропорциональными разностям климатических и предсказываемых значений переменных на свободной поверхности моря с коэффициентом пропорциональности, имеющим смысл обратного времени восстановления. Последнее для температуры и солёности морской воды принимается одинаковым и равным  $10^5$  с.

По результатам моделирования нескорректированный и скорректированный (за счет приливной диапикнической диффузии) коэффициенты вертикального турбулентного перемешивания отличаются друг от друга на несколько порядков величины (рис. 3). Можно ожидать, что вклад эффектов внутренних приливных волн в формирование климата моря Лаптевых будет значимым наряду с другими климатообразующими факторами.

### Литература

1. Janout M. A., Lenn Y.-D. Semidiurnal tides on the Laptev Sea shelf with implications for shear and vertical mixing // *J. Phys. Oceanogr.* 2014. Vol. 44, № 1. P. 202–219. doi: 10.1175/JPO-D-12-0240.1.
2. Lenn Y.-D., Rippeth T. P., Old C. P., Bacon S., Polyakov I., Ivanov V., Hølemann J. Intermittent intense turbulent mixing under ice in the Laptev Sea continental shelf // *J. Phys. Oceanogr.* 2011. Vol.41. P. 531–547. doi: 10.1175/2010JPO4425.1.
3. Luneva M. V., Aksenov Y., Harle J. D. et al. The effects of tides on the water mass mixing and sea ice in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2015. Vol. 120, № 10. P. 6669–6699. doi: 10.1002/2014JC010310.
4. Jayne S. R., St. Laurent L. C. Parameterizing tidal dissipation over rough topography // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28, № 5. P. 811–814. doi:10.1029/2000GL012044.
5. Каган Б. А., Тимофеев А. А. Высокорастворимое моделирование полусуточных внутренних приливных волн в безледный период в море Лаптевых: их динамика и энергетика // *Изв. РАН. Физ. атм. и океана.* 2020. Т. 56, № 5. С. 586–597. doi:10.31857/S0002351520050041.

## ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВОЛНОВОГО СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

К. Ю. Булгаков, канд. физ.-мат. наук

Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

## SIMULATING OF THE STRATIFIED WAVE BOUNDARY LAYER

K. Yu. Bulgakov, Ph.D.

Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

*Ранее разработанная двумерная модель пограничного слоя атмосферы над волнами была дополнена уравнением переноса тепла. В модель были введены функции устойчивости для расчета скорости диссипации и коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии. Проведены эксперименты по воспроизведению стратифицированного волнового пограничного слоя. Оценена значимость волнового потока тепла.*

*The previously created two-dimensional model of wave boundary layer was extended by including heat transfer equation. Stability functions for calculation of dissipation rate and coefficients of turbulent viscosity and diffusion were also included. The experiments on simulating the stratified wave boundary layer structure was run were performed. Wave heat flux values were evaluated.*

Взаимодействие океана и атмосферы можно представить как процессы обмена и трансформации механической энергии, тепла и влаги на различных временных и пространственных масштабах. Ветровые волны — один из важных элементов этого взаимодействия. В [1] подробно описывается цепочка преобразования механической энергии и импульса. Получая механическую энергию от ветра, ветровые волны переносят её на значительные расстояния, после чего передают энергию течениям или турбулентным движениям. Эти процессы в настоящее время успешно воспроизводятся в климатических и прогностических моделях совместной циркуляции атмосферы и океана. В тоже время роль ветровых волн в тепло- и влагообмене океана и атмосферы до настоящего времени детально не исследована.

Наиболее подходящим методом для исследования процессов теплообмена в волновом пограничном слое (далее WBL) является математическое моделирование. Численные модели позволяют выбирать различные условия, при которых будет воспроизводиться воздушный поток, что невозможно для натуральных экспериментов, обработка результатов численных экспериментов гораздо проще, чем обработка натуральных данных.

Явным образом волновые компоненты потоков могут быть воспроизведены 2-х мерными ( $x$  и  $z$  координата) и 3-х мерными моделями пограничного слоя над волнами в негидростатическом приближении. До настоящего времени разработаны несколько подобных моделей [2, 3], все они рассматривают нестратифицированную среду. Таким образом, для воспроизведения теплообмена в волновом пограничном слое данные модели должны быть дополнены.

В качестве основы для модели стратифицированного пограничного слоя была выбрана двумерная совместная модель ветровых волн и пограничного слоя над ними [2]. Атмосферная компонента включает двумерные уравнения Рейнольдса для импульса, уравнения эволюции энергии турбулентности, уравнения эволюции скорости диссипации (дополненные рядом диагностических соотношений); волновая компонента основана на кинематическом и динамическом условиях на поверхности и уравнении Лапласа. Обе компоненты сформулированы в конформных координатах, используют Фурье метод с высоким разрешением

Модификация модели заключалась в следующем: система уравнений модели WBL была дополнена уравнением притока тепла, в формулы расчета коэффициента турбулентности и скорости диссипации введены функций устойчивости, уравнения вертикальной компоненты скорости и эволюции кинетической энергии турбулентности были введены члены плавучести.

Модель имела следующие параметры: спектральное разрешение модели составляло 1000 волновых чисел, что соответствует 4000 точкам в физическом пространстве. Вертикальное разрешение — 40 неравномерных уровней. Высота всей области составляла 0,06 от

горизонтального масштаба. Начальное волновое поле задавалось с помощью спектра JONSWAP [4] с пиком на волновом числе 200. Начальные поля горизонтальной скорости, потенциальной температуры и кинетической энергии строятся по уравнениям теории слабо стратифицированного приземного слоя. Скорость на верхней границе WBL рассчитывалась по значениям обратного возраста волны и фазовой скорости волны пика. Вертикальная скорость в начальный момент времени считалась равной нулю.

Были проведены эксперименты, в которых разница температуры поверхности и температуры на верхней границе принимали значения:  $-1,5$ ;  $0$ ;  $1,5$ ; т. е. воспроизводилась неустойчивая, нейтральная и устойчивая стратификации. Каждый эксперимент проводился на 2500 безразмерных единиц времени, что обеспечивало выход модели на стационарный режим, который определялся условием постоянства потоков импульса и тепла по высоте. Модельные поля полученные на последних 250 безразмерных единицах времени, осреднялись по времени и горизонтальной координате. Также были проведены три эксперимента аналогичные вышеописанным, но над неподвижной ровной поверхностью (далее SL).

На рис. 1 показаны профили компонент потоков импульса нормированные на тангенциальное напряжение трение. В SL значение баланса импульса (в который входит только турбулентный поток) постоянно по высоте, при этом нормированное значение баланса в нейтрально стратифицированном 1, в устойчивом меньше 1, а в неустойчивом больше 1, что полностью соответствует теории приземного слоя атмосферы над неподвижной поверхностью. Баланс импульса в WBL также постоянен по высоте, его значение примерно на 17 % больше чем значения баланса в SL для соответствующих типов стратификаций. Баланс импульса в WBL состоит из трех компонент, кроме турбулентного потока в него также входят поток импульса, создаваемого скоростями, генерируемыми волнами (далее волновой поток импульса), а также поток импульса, генерируемый пульсациями давления. Как видно из рис. 1, профили волнового потока импульса при разных стратификациях практически совпадают. На поверхности данный поток равен 0, далее возрастает примерно до значения 0,2 на высоте 0,003, после чего начинает плавно уменьшаться до 0 на верхней границе WBL. Профили потока импульса генерируемого пульсациями давления при различных стратификациях также практически одинаковы. На поверхности значение этого потока около 0,15; с высотой он плавно уменьшается, достигая 0 на верхней границе.

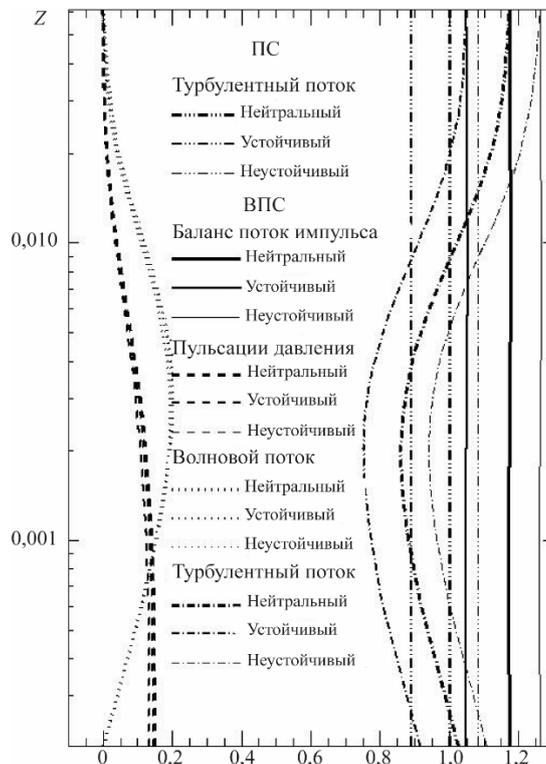


Рис. 1. Компоненты потоков импульса.

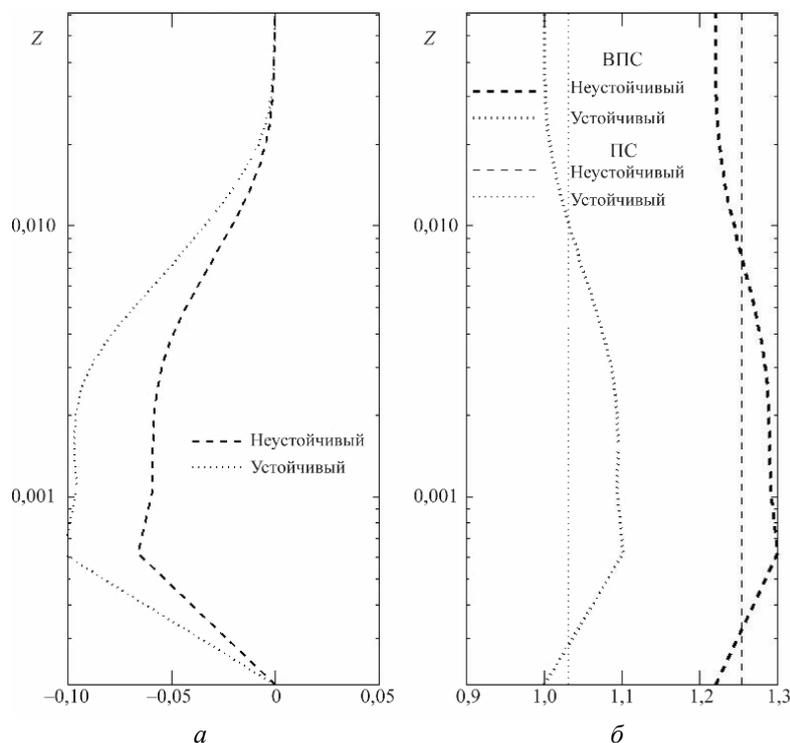


Рис. 2. Компоненты потоков тепла.

$a$  — волновой поток тепла;  $b$  — турбулентный поток тепла.

Турбулентные потоки импульса в WBL у поверхности на 2–3 % больше, чем турбулентные потоки в SL для соответствующих стратификаций. От поверхности до уровня 0,003 турбулентные потоки в WBL уменьшаются примерно на 12 %, после чего возрастают, достигая на верхней границе значения баланса импульса.

Волновой поток массы, нормированный на поверхностное значение турбулентного потока массы на поверхности, (рис 2,  $a$ ) для обеих стратификаций имеет отрицательный знак, т.е. направлен в обратную сторону относительно турбулентного потока и компенсирует его увеличение относительно поверхностного значения. У поверхности волновой поток массы равен 0, растет до уровня 0,0006, далее уменьшается до верхней границы WBL, где становится равным 0. В неустойчивом WBL волновой поток массы достигает 5 % от суммарного потока, в устойчивом WBL — 10 %. Данное различие объясняется тем, что в устойчивом WBL турбулентный поток подавляется стратификацией, и его вклад в суммарное значение потока тепла меньше, чем в случае неустойчивого WBL. Поверхностные значения турбулентных потоков массы в WBL на 2–3 % меньше, чем поверхностные значения в SL.

Основной вывод, полученный в результате данных экспериментов, — волновой поток тепла является значимым, хоть и существенно меньше, чем турбулентный. Учет этой компоненты потока тепла может улучшить качество расчета атмосферных полей в моделях циркуляции атмосферы.

#### Литература

1. Чаликов Д. В., Булгаков К. Ю. Ветровые волны как элемент гидродинамической системы океан атмосфера // Изв. РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 3. С. 386–391.
2. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer // Boundary-Layer Meteorol. 2010. Vol. 138. P. 1–41.
3. Sullivan P. P., McWilliams J. C., Patton E. G. 2014. Large-eddy simulation of marine boundary layers above a spectrum of moving waves // J. of the Atmospheric Sciences. Vol. 71, № 11. P. 4001–4027.
4. Hasselmann K., Barnett R. P., Bouws E. et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrogr. Inst., 1973. 95 p.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР И ПРИЧИНЫ ИХ ГЕНЕРАЦИИ ВБЛИЗИ БЕРИНГОВА ПРОЛИВА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

О. А. Атаджанова<sup>1</sup>, канд. геогр. наук, А. В. Зимин<sup>1,2</sup>, д-р геогр. наук, С. А. Юдина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

## STATISTICAL ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF SURFACE MANIFESTATIONS OF EDDY STRUCTURES AND THE REASONS FOR THEIR GENERATION NEAR THE BERING STRAIT ACCORDING TO SATELLITE DATA

O. A. Atadzhanova<sup>1</sup>, Ph.D., A. V. Zimin<sup>1,2</sup>, Dr.Sc., S. A. Yudina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*Работа посвящена исследованию пространственно-временного распределения поверхностных проявлений вихревых структур с масштабом от сотен метров до десятка километров в Беринговом проливе и прилегающих акваториях по спутниковым радиолокационным изображениям за август 2017, 2018 и 2019 гг. Всего было детектировано 530 проявлений вихревых структур преимущественно циклонического типа вращения. Районы частой встречаемости выделены около острова Св. Лаврентия и восточных берегов Чукотского полуострова.*

*The work is devoted to the study of the spatio-temporal distribution of surface manifestations of eddy structures ranging from hundreds of meters to tens of kilometers in the Bering Strait and adjacent waters from satellite radar images for August 2017, 2018 and 2019. In total, 530 manifestations of eddy structures of predominantly cyclonic type of rotation were detected. Areas of maximum occurrence are identified near St. Lawrence Island and the eastern shores of the Chukchi Peninsula.*

Малые вихревые структуры активно изучаются в различных районах Мирового океана ввиду их влияния на турбулентный обмен [1], баланс сил плавучести [2] и, соответственно, на перераспределение биогенных элементов, что принципиально для экосистем [3], а значит и добычи биоресурсов [4]. Однако их исследования в Беринговом проливе и прилегающих акваториях носят отрывочный характер.

Берингов пролив — это пролив, соединяющий Тихий океан (Берингово море) и Северный Ледовитый океан (Чукотское море) и осуществляющий водообмен между ними. В работе [5] по выполненным обобщениям за 2007, 2011 и 2018 гг. было показано, что для западной Арктики, куда входит Чукотское море, вихревые структуры с размерами от 0,5 до 100 км встречаются в целом чаще всего в августе, при этом большая часть вихрей относилась к субмезомасштабу, так как была сопоставима с радиусом Россби (в южной части на мелководье до 3–4 км). Схожий результат был получен и для Берингова моря за 2020 г. в работе [6] для вихрей с диаметром от сотен метров до десятка километров, среди которых также большинство проявлений относилось к субмезомасштабу (радиус Россби на мелководье порядка первых единиц километров). Но стоит отметить, что ни в одной из работ не были рассмотрены вихревые структуры в Берингом проливе, хотя именно в районах с ярко выраженными течениями, неоднородными глубинами и изрезанными берегами можно ожидать интенсификации вихреобразования. Поэтому в данной работе в качестве исследуемого района рассматривается территория Берингова пролива и прилегающие к нему акватории к северу (южная часть Чукотского моря) и к югу (северная часть Берингова моря) от него, которые ограничены по широте прямоугольной областью 62,5–68,3° с.ш. и по долготе 175–160° з.д.

Целью работы является сравнительный анализ характеристик поверхностных проявлений малых вихрей с пространственным масштабом от сотен метров до десятка километров по радиолокационным данным за август нескольких лет (2017–2019 гг.).

Для регистрации проявлений вихревых структур в качестве исходных данных использовалось около 250 радиолокационных изображений (РЛИ) за август 2017, 2018, 2019 гг. Покрытие как по акватории, так и по годам оказалось относительно неравномерным. Если в августе 2017 и 2018 гг. в проливе и вблизи него покрытие составляло порядка 10–12 РЛИ, то в

2019 г. — 18–20 РЛИ. Наименее обеспеченным снимками районом за весь период оказался залив Нома (рис. 1).

За проявления вихрей на РЛИ принимались структуры в виде закрученных в спирали или дуги светлых или темных (относительно фона) полос, которые можно было вписать в эллипс. В качестве характеристик проявлений регистрировались следующие характеристики: положение центра структуры, диаметр и тип вихря (антициклонический (Ас) — закрутка по часовой стрелки, циклонический (Сп) — закрутка против часовой стрелки).

Для выявления связи поверхностных проявлений и ветровых условий строились композитные карты за дни с наибольшим количеством проявлений, включающие в себя положения центров вихрей, границы РЛИ и данные о среднесуточной скорости ветра, которые были получены при осреднении 6-ти часовых данных о характеристиках приводного ветра WIND\_GLO\_WIND\_L4\_REP\_OBSERVATIONS\_012\_006 (<https://marine.copernicus.eu/>).

Всего было зарегистрировано 530 поверхностных проявлений вихревых структур с диаметром от 0,5 до 13,6 км, при этом количество антициклонических вихрей составило от 3 до 8 % в зависимости от года. Распределение центров проявлений по акватории представлено на рис. 2. Видно, что каждый год вихри отмечались вблизи острова Св. Лаврентия, расположенном в северной части Берингова моря, а также у восточных берегов Чукотского полуострова. В Чукотском море — к западу от залива Коцебу.

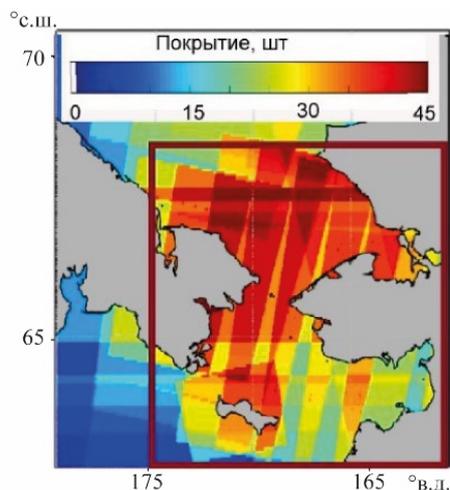


Рис. 1. Карта покрытия РЛИ исследуемой акватории за август 2017–2019 гг.

Темно-красным прямоугольником обозначен исследуемый район.

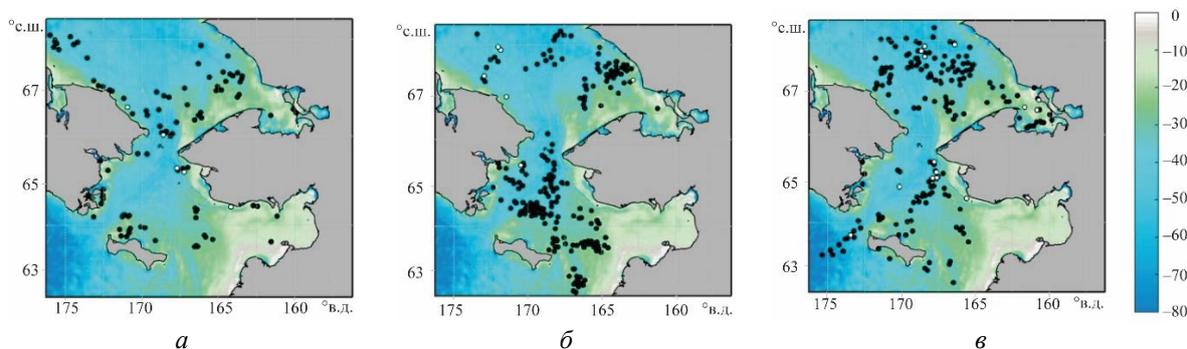


Рис. 2. Карты распределения положения центров вихревых проявлений за август 2017 г. (а), 2018 г. (б), 2019 г. (в).

Белый круг — Ас; черный — Сп; шкала глубины в км.

Наибольшее количество вихрей отмечалось в августе 2018 г. Средний диаметр в этот год также был максимальным, как для циклонических вихрей, так и для антициклонических, в сравнении с другими годами (табл. 1). При этом наибольшее число вихрей было сосредоточено в проливе и к югу от него. В 2019 г. вихрей было немногим меньше, чем в 2018 г., но при этом средний диаметр был значительно меньше, особенно среди антициклонических вихрей. В 2017 г. было зарегистрировано почти в 2 раза меньше проявлений, чем в 2018 или 2019 гг. При этом вблизи пролива (с южной стороны) вихри регистрировались реже, чем в другие года.

Таблица 1

Характеристики проявлений вихрей в августе разных лет

| Год  | Количество, шт |     |       | Средний диаметр, км |     |       |
|------|----------------|-----|-------|---------------------|-----|-------|
|      | Ac             | Cn  | Общее | Ac                  | Cn  | Общий |
| 2017 | 5              | 101 | 106   | 2,3                 | 2,9 | 2,9   |
| 2018 | 6              | 215 | 221   | 4,4                 | 3,1 | 3,1   |
| 2019 | 16             | 187 | 203   | 2,1                 | 2,7 | 2,7   |

Пространственное распределение диаметров показало, что крупные вихри (свыше 5 км) отмечались редко и в разные годы отмечались в разных местах. В проливе и к северу от него средние диаметры вихрей на единицу сетки (1 тыс. км<sup>2</sup>) от 2 км встречались чаще, чем к югу от него. При этом стоит отметить, что в целом по акватории за весь период вихри с диаметром от 1 до 3 км составили более 55 % от всех проявлений (рис. 3), что позволяет отнести их к субмезомасштабу. Вихри с диаметрами более 5 км регистрировались в 10 % случаев.

Для выявления причин столь неравномерного распределения вихрей по акватории были привлечены данные по приводному ветру, т.к. он является важнейшим параметром, влияющим на проявления морских процессов на РЛИ. В части работ [7, 8] по исследованию вихрей по РЛИ утверждается, что пленочный механизм, за счет которого проявляются вихревые структуры на поверхности, «работает» при слабых и умеренных ветрах (до 6–7 м/с), а сдвигово-волновой механизм позволяет регистрировать вихри при скоростях ветра до 9 м/с [9]. В нашем случае сопоставление данных по скоростям ветра, положений вихревых структур и границ РЛИ показало, что вихревые структуры регистрируются преимущественно при скоростях ветра до 4–5 м/с (рис. 4). При этом крайне редко отмечались вихри в зонах 6–7 м/с. Неоднократно отмечались ситуации, когда радиолокационные изображения по большей части покрывали районы со скоростями выше 7 м/с, что очевидно, является одной из основных причин отсутствия проявлений вихрей на РЛИ.

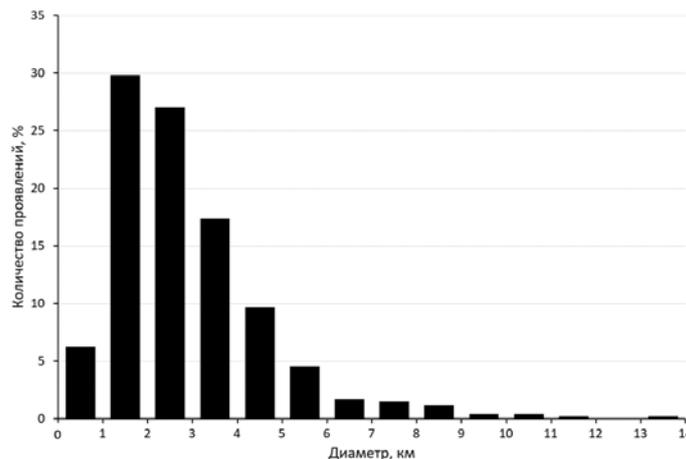


Рис. 3. Гистограмма распределения количества вихревых проявлений в зависимости от диаметра.

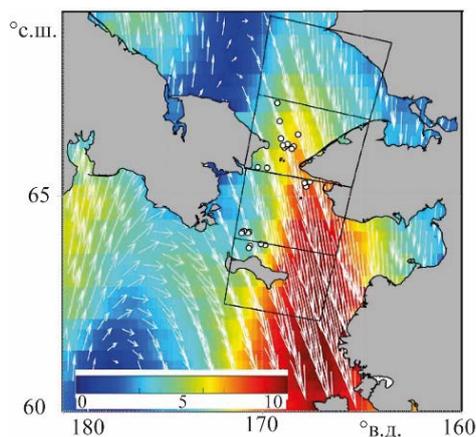


Рис. 4. Распределение центров вихревых проявлений, положений РЛИ на поле скорости ветра за 20.08.2017

В целом данное исследование позволило выявить, что малые (субмезомасштабные) вихревые структуры — характерное явление для августа на акватории Берингова пролива и вблизи него с пространственным масштабом порядка единиц километров (со средним диаметров около 3 км) и сопоставимо по масштабам с радиусом Россби. Средние диаметры вихревых проявлений за несколько лет схожи, соотношение циклонических и антициклонических вихрей во все года не превышало 8 %. Неравномерное распределение проявлений на акватории в разные года отличается незначительно. Как показало сопоставление со скоростями ветра, в первую очередь, разница в распределении может обуславливаться ветровыми условиями, так как вихри преимущественно регистрировались на РЛИ при слабых и малых скоростях ветра.

#### *Литература*

1. Зимин А. В. Субприливные процессы и явления в Белом море. М: ГЕОС, 2018. 220 с.
2. Кубряков А. А., Лишаев П. Н., Чепыженко А. И., Алескерова А. А., Кубрякова Е. А., Медведева А. В., Станичный С. В. Влияние субмезомасштабных вихрей на перенос взвешенного вещества в прибрежной зоне Крыма по данным БПЛА, спутниковых и контактных измерений // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 2. С. 182–197
3. Belevich T. A., Pyash L. V., Zimin AV., Kravchishina MD., Novikhin A. E., Dobrotina E. D. Peculiarities of summer phytoplankton spatial distribution in Onega Bay of the White Sea under local hydrophysical conditions // *Moscow Univ. Biol. Sci. Bull.* 2016. Vol. 71, № 3. P. 135–140
4. Lévy M., Ferrari R., Franks P. J. S., Martin A. P., Rivière P. Bringing physics to life at the submesoscale // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39, № L14602.
5. Kozlov I. E., Artamonova A. V., Manucharyan G. E., Kubryakov A. A. Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124(9). P. 6601–6616
6. Круглова К. А., Атаджанова О. А., Зимин А. В. Особенности субмезомасштабной вихревой динамики дальневосточных морей летом 2020 года // Тезисы 19 междунар. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». 2021. С.243.
7. Johannessen, J. A., Shuchman R. A., Digranes G., Lyzenga D. R., Wackerman C., Johannessen O. M., Vachon P. W. Coastal Ocean fronts and eddies imaged with ERS1 synthetic aperture radar // *J. Geophys. Res.* № 101(C3). P. 6651–6667.
8. Dokken S. T., Wahl T. Observations of spiral eddies along the Norwegian Coast in ERS SAR images // *FFI Rapport 96/01463*. 1996.
9. Gade M., Stuhlmacher A., Updated Eddy Statistics For The Western Mediterranean Based On Three Years Of Sentinel-1A Sar Imagery, Proceedings of IGARSS'19, Yokohama, 2019. P. 8086-8089.

Работа производилась в рамках государственного задания по теме № FMWE-2021-0014.

## ОСОБЕННОСТИ СИНОПТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

А. А. Коник<sup>1,2</sup>, А. В. Зимин<sup>1,2</sup>, д-р геогр. наук

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

## FEATURES OF THE SYNAPTIC DYNAMICS OF THE FRONTAL ZONES OF THE BARENTS AND KARA SEAS

A. A. Konik<sup>1,2</sup>, A. V. Zimin<sup>1,2</sup>, Dr.Sc.

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*Работа посвящена анализу характеристик поверхностных проявлений Полярной и Стоковой фронтальных зон за май–октябрь 2002–2020 гг. Фронтальные зоны детектировались методом кластерного анализа, применяемого к массивам температуры, солености и их градиентов, осреднённых за синоптические (8-ми дневные) интервалы. Установлено, что в Полярной фронтальной зоне за тёплый сезон средний градиент температуры составляет 0,07°C/км, в Стоковой – 0,08°C/км. Показано, что на фоне изменения климата за рассмотренный период наблюдается уменьшение градиента температуры и площади данных фронтальных зон.*

*The work is devoted to the analysis of the characteristics of the surface manifestations of the Polar and River Plumes frontal zones during May–October 2002–2020. Frontal zones were detected by cluster analysis applied to arrays of temperature, salinity and their gradients averaged over synoptic (8-day) intervals. In the Polar frontal zone during the warm season, the average temperature gradient is 0.07°C/km, in the River Plumes frontal zone — 0.08°C/km. Against the background of climate change during the considered period, a decrease in the temperature gradient and the area of these frontal zones is observed.*

В последние десятилетия в Арктике наблюдаются значительные климатические изменения, которые выражаются в уменьшении площади льдов и усилении теплопереноса в Арктику [1, 2]. Данная климатическая изменчивость может влиять на формирование и пространственную динамику поверхностных фронтальных зон в Баренцевом и Карском морях. В Баренцевом море находится Полярная фронтальная зона (ПФЗ), которая формируется в области взаимодействия теплых атлантических и холодных арктических вод. В Карском море на границе речного плюма, образованного крупными сибирскими реками Обью и Енисеем, детектируется Стоковая фронтальная зона (СФЗ). До настоящего времени отсутствует описание особенностей внутримесячной динамики характеристик ПФЗ и СФЗ за несколько десятилетий, что не позволяет полноценно оценить их изменчивость в условиях меняющегося климата.

Таким образом, цель данной работы — анализ пространственно-временной изменчивости и получение количественных оценок поверхностных проявлений основных фронтальных зон в Баренцевом и Карском морях за период с мая по октябрь 2002–2020 гг.

Для идентификации термических фронтальных зон использовались синоптические (8-ми дневные временные интервалы) данные температуры поверхности Баренцева и Карского моря (ТПМ) уровня обработки L3 спутникового радиометра Suomi NPP VIIRS с пространственным разрешением 0,05° по широте и долготе. Изменчивость солености поверхности моря (СПМ) описывали данные уровня обработки L3 спутника NASA SMAP с пространственным разрешением 0,25° по широте и долготе. Для динамического фронта были взяты суточные данные абсолютной динамической топографии (АДТ) из базы AVISO с пространственным разрешением 0,25° по широте и долготе. Согласно методике из работы [5] для идентификация фронтальных зон и оценки их характеристик использовался кластерный анализ. Для выделенных областей фронтальных зон определялись средние ТПМ, СПМ, АДТ и их градиентов, а также занимаемая ими площадь.

Анализ результатов работы показал, что ПФЗ на поверхности с мая по июнь наблюдается в южной части Баренцева моря вблизи о. Медвежий и далее вдоль Западного желоба и Центральной возвышенности. Градиент температуры в области фронтальной зоны в этот период варьируется от 0,02°C/км до 0,1°C/км, а средняя площадь составляет 216 тыс. км<sup>2</sup>. В июле–августе

фронтальная зона смещается на север и увеличивается в меридиональном направлении, достигая западной части арх. Новая Земля, площадь фронтальной зоны увеличивается до 300 тыс. км<sup>2</sup>. Градиент ТПМ в ПФЗ меняется от 0,03°C/км до 0,2°C/км в зависимости от внутримесячной изменчивости. В сентябре поверхностные проявления ПФЗ наблюдаются в центральной и северной частях Баренцева моря, достигая арх. Шпицбергена. В этот месяц интенсивность ПФЗ на поверхности ослабевает — величина градиентов ТПМ в ПФЗ колеблется от 0,03°C/км до 0,1°C/км, а её средняя площадь постепенно уменьшается до 288 тыс. км<sup>2</sup>. В октябре фронтальная зона снова смещается в южную часть Баренцева моря, её интенсивность на фоне развивающегося осеннего выхолаживания продолжает уменьшаться: градиент ТПМ снижается до 0,06°C/км, а площадь до 238 тыс. км<sup>2</sup>.

В Карском море СФЗ в июле чаще всего располагается вблизи п-ва Ямал и в течении месяца расширяется по направлению к арх. Новая Земля и к Сибирскому побережью. Величина температурного градиента составляет 0,13°C/км, солёного 0,18‰/км, а площадь — 137 тыс. км<sup>2</sup>. В августе зона смещается на северо-восток, её граница смещается ближе к п-ву Таймыр. Спад величины речного стока и слабые ветра [4] уменьшают градиенты ТПМ и СПМ, которые в этот месяц составляют 0,08°C/км и 0,12‰/км, при этом средняя площадь почти не меняется и составляет около 138 тыс. км<sup>2</sup>. В августе и октябре зона резко смещается на восток, располагаясь вдоль Сибирского побережья, градиенты характеристик падают до 0,05°C/км, и до 0,09‰/км, что, вероятно, связано с усиливающимся выхолаживанием поверхности и началом осенней межени на реках Обь и Енисей.

Анализ данных за два десятилетия показал, что во втором десятилетии XXI века интенсивность градиента ТПМ в ПФЗ в среднем уменьшилась на 0,02°C/км, в СФЗ на 0,04°C/км. Кроме этого, величина площади ПФЗ сократилась на 25 тыс. км<sup>2</sup>, а СФЗ на 50 тыс. км<sup>2</sup>. Наиболее заметная изменчивость в основных параметрах фронтальных зон наблюдается в сентябре.

Отмеченные изменения показывают, что фронтальные зоны арктических морей также являются индикатором происходящих значительных климатических изменений.

#### *Литература*

1. Serreze M. C., Stroeve J. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting // *Philosophical transactions: mathematical, physical and engineering science*. 2015. Vol. 373, № 2045, P. 20140159.
2. Feltham D. Arctic Sea ice reduction: the evidence, models and impacts // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. Vol. 373, № 2045, P. 20140171.
3. Ivshin V. A., Trofimov A. G., Titov O. V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting // *ICES Journal of Marine Science*. 2019. Vol. 76. Issue Supplement 1. P. i3-i9.
4. Osadchiv A. A., Frey D. I., Shchuka S. A., Tilinina N. D., Morozov E. G., Zavialov P. O. Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods // *J. of Geophysical Research: Oceans*. 2020.
5. Konik A. A., Zimin A. V., Kozlov I. E. Spatial and temporal variability of the polar frontal zone characteristics in the Barents sea in the first two decades of the XXI century // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Vol. 14, № 4, P. 39–51.
6. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. *Моря СССР*. М.: МГУ. 1982. 192 с.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №20-35-90053 аспиранты.

## МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Е. И. Свергун<sup>1,2</sup>, А. В. Зимин<sup>1,2</sup>, д-р геогр. наук

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

## MESOSCALE EDDIES AND SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES OF THE KURIL-KAMCHATKA REGION FROM SATELLITE DATA

E. I. Svergun<sup>1,2</sup>, A. V. Zimin<sup>1,2</sup>, Dr.Sc.

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*В работе рассмотрена связь вихревой динамики и короткопериодных внутренних волн на акватории вблизи тихоокеанского шельфа Камчатского полуострова. Положение мезомасштабных вихрей определялось в поле абсолютной динамической топографии, а образованные ими фронтальные зоны выделялись по полю градиента температуры поверхности океана. Проявления волн регистрировались на радиолокационных изображениях. Показано, что области фронтальных зон мезомасштабных вихрей могут являться в данном регионе отдельным источником генерации внутренних волн.*

*The paper considers the connection between eddies dynamics and short-period internal waves in the water area near the Pacific shelf of the Kamchatka Peninsula. The position of mesoscale eddies was determined in the field of absolute dynamic topography, and the frontal zones formed by them were distinguished by the field of the ocean surface temperature gradient. Wave manifestations were recorded on radar images. It is shown that the regions of the frontal zones of mesoscale eddies can be a separate source of generation of internal waves in this region.*

Акватория вблизи тихоокеанского побережья Камчатки и Курильской гряды отличается сложным рельефом дна с узким шельфом, крутым материковым склоном и протяженным глубоководным желобом [1]. Динамической особенностью региона является наличие Восточно-Камчатского течения (западное пограничное течение субарктического круговорота Тихого океана) и интенсивной приливной динамики [2]. Взаимодействие приливного потока и рельефа дна приводят к образованию внутренних приливных волн с их последующим распадом. В результате чего в регионе отмечается широкое распространение проявлений короткопериодных внутренних волн (КВВ), что подтверждается данными спутниковых наблюдений [3]. В работе [4] было произведено сопоставление положений проявлений КВВ с очагами генерации внутренних приливных волн (ВПВ), которое показало, что в августе 2019 г. в области очагов генерации ВПВ находится до 70 % проявлений КВВ. Около юго-восточного побережья Камчатки не было выявлено очагов генерации ВПВ, однако здесь часто регистрируются проявления КВВ. Согласно [5], акватория около южной оконечности полуострова Камчатка характеризуется частым присутствием мезомасштабных вихревых структур [5]. Они формируются под влиянием неустойчивости Восточно-Камчатского течения и вносят значительный вклад в формирование гидрологической структуры вод. Как известно [6], при взаимном геострофическом приспособлении разных по природе потоков происходит развитие вторичной циркуляции со значительными вертикальными скоростями в верхнем слое вод. При наличии приповерхностного пикноклина это может стать источником генерации КВВ [7]. Соответственно можно полагать, что очаги генерации КВВ в Курило-Камчатском регионе могут быть связаны не только с распадом внутреннего прилива. Таким образом, *цель настоящей работы* — проанализировать особенности положения мезомасштабных вихревых структур и проявлений КВВ на акватории около юго-восточного побережья Камчатки по данным спутниковых наблюдений для оценки их возможной связи.

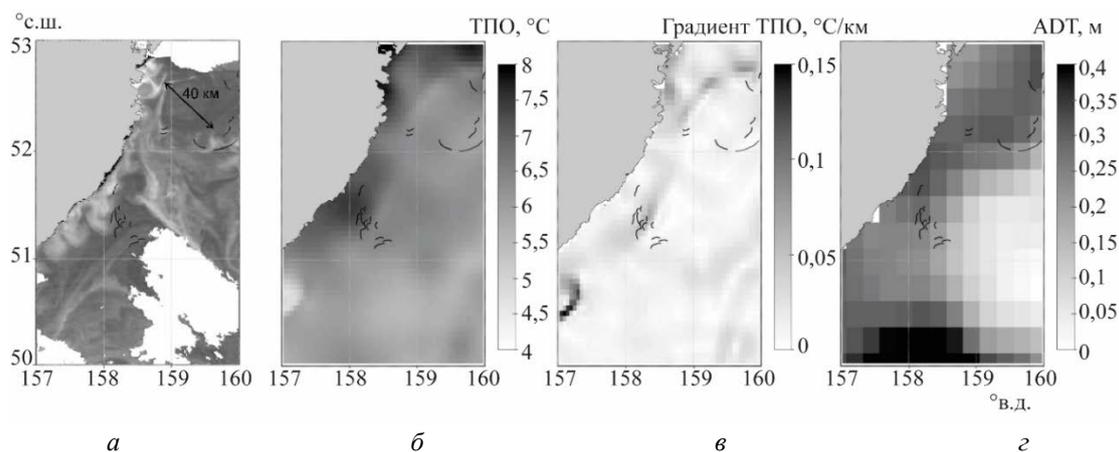


Рис. 1. Композитные карты положений проявлений КВВ с полями.

*a* — яркости зеленого канала спутникового изображения Suomi NPP; *б* — ТПО;  
*в* — градиента ТПО; *г* — абсолютной динамической топографии.

В качестве *исходных данных* использовались радиолокационные изображения (РЛИ) со спутника Sentinel-1 с пространственным разрешением 25 м. Было рассмотрено более 800 РЛИ, охватывающих период с 1 декабря 2018 г. по 30 ноября 2019 г. Для поверхностных проявлений КВВ определялись положение проявления, длина волны, длина дуги лидирующего гребня в пакете, направление распространения, количество волн в пакете. Для выделения мезомасштабных вихревых структур и фронтальных зон использовались спутниковые изображения в видимом диапазоне со спутников Aqua/Terra MODIS и Suomi NPP, температура поверхности океана (ТПО) продукта GHRSSST (<https://www.ghrsst.org/ghrsst-data-services/products/>), а также абсолютная динамическая топография (АДТ) продукта Copernicus с усвоением спутниковых данных TOPEX ([https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL\\_GLO\\_PHY\\_L4\\_NRT\\_OBSERVATIONS\\_008\\_046/INFORMATION](https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_NRT_OBSERVATIONS_008_046/INFORMATION)).

Выполнялся отбор случаев, когда в области юго-восточного побережья Камчатки отмечалось максимальное количество проявлений КВВ. Такие случаи наблюдались 9 и 21 июня, 15 июля, 1 и 13 сентября, 7 октября, 12 ноября. Для выделенных дат подбирались спутниковые данные в видимом диапазоне и данные реанализа. Рассчитывался градиент ТПО продукта GHRSSST по методике [8]. По максимальному градиенту определялось положение фронтальных зон. Производились построение и анализ композитных карт, сочетающих положение проявлений КВВ и полей спутниковых данных и данных реанализа.

В указанные ранее даты на акватории юго-восточного побережья Камчатки в общей сложности было зарегистрировано 118 проявлений КВВ, что составляет около 6 % от общего числа проявлений, зарегистрированных в период с 1 декабря 2018 г. по 30 ноября 2019 г. Это указывает на довольно высокую активность внутреннего волнения на данной акватории, ведь указанное число проявлений регистрируется за 7 дней.

На рис. 1 продемонстрирован случай регистрации проявлений КВВ в области мезомасштабной вихревой структуры и фронтальной зоны 21 июня.

Из рис. 1, *a* видно, что в северо-восточной части акватории присутствовала мезомасштабная вихревая структура диаметром около 40 км, а в юго-западной части акватории — характерное проявление фронтальной зоны, связанной с Курило-Камчатским течением. Видно, что указанные структуры находят свое проявление в поле ТПО и ее градиента, а также, менее явно, в поле АДТ. Анализ карт позволил выявить, что на периферии вихревой структуры находятся проявления КВВ, кривизна лидирующих гребней и направление распространения которых указывает на то, что они генерированы при взаимодействии мезомасштабного вихря с пикноклином. В области фронтальной зоны, положение которой достаточно четко выделяется по градиенту ТПО, находится скопление проявлений КВВ. Их направление распространения и малое расстояние между ними также указывает на их генерацию при взаимодействии фронтальной зоны с пикноклином. Аналогичный анализ был выполнен для всех выделенных

случаев частой встречаемости проявлений КВВ. В результате анализа было выявлено, что суммарно для всех случаев, в области вихревых структур и фронтальных зон находится 70 % (85 из 118) проявлений КВВ. То есть наряду с приливной динамикой, на выделенном участке акватории Курило-Камчатского региона важную роль в генерации КВВ может играть мезомасштабная вихревая динамика образованная неустойчивостью крупномасштабного течения.

#### *Литература*

1. Богданов К. Т., Мороз В. В. Структура, динамика и гидролого-акустические характеристики вод проливов Курильской гряды. Владивосток: Дальнаука, 2000. 152 с.
2. Morozov E. G. Oceanic Internal Tides. Observations, Analysis and Modeling // A Global View, Springer, Switzerland, 2018. 316 p.
3. Свергун Е. И., Зимин А. В., Лазуткина Е. С. Характеристики проявлений короткопериодных внутренних волн Курило-Камчатского региона по данным спутниковых наблюдений в летний период. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14, № 1. С. 106–115.
4. Зимин А. В., Жегулин Г. В., Свергун Е. И. и др. Потенциальные очаги генерации внутреннего прилива и проявления короткопериодных внутренних волн на Тихоокеанской акватории Курило-Камчатского региона // Тез. докладов Всерос. научной конф. «Моря России: Год науки и технологий в РФ - Десятилетие наук об океане ООН». Севастополь, 20–24 октября 2021 года. Севастополь: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», 2021. С. 115–116.
5. Rogachev, K.A., Shlyk, N.V. Characteristics of the Kamchatka Current Eddies // *Russ. Meteorol. Hydrol.* 44, 416–423 (2019). <https://doi.org/10.3103/S1068373919060062>.
6. Chapron B., Kudryavtsev V. N., Collard F., Rasche N., Kubryakov, A. A., Stanichny S. V. Studies of Sub-Mesoscale Variability of the Ocean Upper Layer Based on Satellite Observations Data // *Physical Oceanography*, [e-journal]. 2020. Vol. 27(6). P. 619–630. doi:10.22449/1573-160X-2020-6-619-630
7. Lavrova O.; Mityagina M. Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas. *Remote Sens.* 2017. Vol. 9. P. 892. <https://doi.org/10.3390/rs9090892>.
8. Konik A. A., Zimin A. V., Kozlov I. E. Spatial and Temporal Variability of the Polar Frontal Zone Characteristics in the Barents Sea in the First Two Decades of the XXI Century // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2021. Vol. 14, № 4. P. 39–51. doi: 10.7868/S2073667321040043.

## О СРЕДНИХ ПОТЕРЯХ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ДВУМЕРНОМ ВОЛНОВОДЕ СО СЛУЧАЙНЫМ ДНОМ И ШЕРОХОВАТОЙ ПРОНИЦАЕМОЙ ДОННОЙ ГРАНИЦЕЙ

О. Э. Гулин, д-р физ.-мат. наук, И. О. Ярошук, д-р физ.-мат. наук

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

## ON AVERAGE LOSSES OF LOW-FREQUENCY SOUND DURING PROPAGATION IN A TWO-DIMENSIONAL WAVEGUIDE WITH RANDOM BOTTOM AND ROUGH PENETRABLE BOTTOM BOUNDARY

O. E. Gulin, Dr.Sc., I. O. Yaroshchuk, Dr.Sc.

V.I. Ilychev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

*Для низкочастотного звукового сигнала, распространяющегося в двумерно-неоднородном мелководном волноводе, на основе статистического моделирования и локально-модового подхода рассмотрено влияние случайной батиметрии (флуктуирующей донной границы). Исследование проведено для условий мелкого моря, соответствующих прибрежным волноводам арктических морей. Особенностью здесь является присутствие почти однородного водного слоя при разнообразных характеристиках донных осадков. Для описания последних принята модель случайного импеданса. Для условий сильно пропускающей в среднем донной границы расчеты прогнозируют весьма слабое влияние флуктуаций батиметрии на среднюю интенсивность звука.*

*For a low-frequency sound signal propagating in a two-dimensionally inhomogeneous shallow-water waveguide, the influence of random bathymetry (fluctuating bottom boundary) is considered based on statistical modeling and the local-mode approach. The study was carried out for shallow sea conditions corresponding to the coastal waveguides of the Arctic seas. A feature here is the presence of an almost homogeneous water layer with various characteristics of bottom sediments. A random impedance model is adopted to describe the latter. For conditions of a bottom boundary that is strongly penetrable on average, calculations predict a very weak effect of bathymetry fluctuations on the average sound intensity.*

В настоящей работе рассмотрено совместное влияние случайных неоднородностей дна, его импеданса и шероховатой поверхности, на энергетические потери при распространении низкочастотных акустических сигналов в двумерном волноводе мелкого моря. Рассеянию звука на шероховатых поверхностях посвящено большое количество работ. Среди них укажем только наиболее близкие по постановке задачи к нашему исследованию [1–3]. Что касается влияния на распространение звука флуктуаций параметров донных осадков, в первую очередь, скорости звука, то таких работ весьма мало. Влияние неоднородностей донных осадков на потери при распространении низкочастотного звука в детерминированной постановке рассмотрено в работах [4, 5] применительно к российскому шельфу арктических морей (Карское море). В статистической постановке, для флуктуаций скорости звука в донных осадках, исследования выполнены в работах [6, 7], где показана возможность существенного влияния случайного характера параметров осадков на потери при распространении низкочастотного звука. Наибольший эффект достигается в случае, когда донная граница мелководного волновода в среднем является сильно пропускающей. Представляет очевидный интерес сопоставить влияние обоих типов флуктуаций неоднородностей, которые наблюдаются в реальной среде мелкого моря, на распространение низкочастотных звуковых сигналов. Исследование выполнено на основе статистического моделирования средней интенсивности звука, описывающей энергетические потери при распространении сигнала в случайно-неоднородной среде.

**Математическая постановка задачи.** Акустическое поле частоты  $\omega$  в двумерно-неоднородном волноводе мелкого моря описывается линейными уравнениями акустики с граничными условиями на поверхности и дне волновода. В аксиально-симметричной постановке задачи при постоянной плотности  $\rho$  в водной толще для функции акустического давления  $p$  они сводятся к уравнению Гельмгольца вида [8]

$$\left( r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \right) p(r, z) = -\frac{\delta(r) \delta(z - z_0)}{2\pi r}, \quad (1)$$

где  $(r, z)$  — координаты цилиндрической системы, а точечный источник излучения расположен в точке  $(r = 0, z = z_0)$ ;  $c$  — скорость звука в воде. Граничное условие на поверхности  $p(r, 0) = 0$ , а условие на дне соответствует непрерывности давления и нормальной к границе  $H(r)$  компоненты скорости. В волновой зоне источника поле давления  $p(r, z)$  ищем с помощью разложения по локальным модам нерегулярного 2D волновода [9]:

$$p(r, z) = \sum_n G_m(r) \varphi_m(r, z); \quad \frac{\partial^2}{\partial z^2} \varphi_m(r, z) + [k^2 - \kappa_m^2(r)] \varphi_m(r, z) = 0. \quad (2)$$

В (2)  $k = \omega/c$ ,  $\kappa_m(r)$  — собственные значения, а  $\varphi_m$  — собственные функции задачи Штурма-Лиувилля ( $m = 1, 2, \dots$ ), которые на поверхности и на дне океана удовлетворяют следующим граничным условиям:  $\varphi_m(r, 0) = 0$ ,  $\varphi_m(r, H) + g_m(r) \varphi_m'(r, H) = 0$ . Здесь  $g_m(r)$  характеризует импеданс проницаемого дна и вместе с шероховатой границей  $H(r)$  является случайной функцией благодаря флуктуациям скорости звука  $c_1$  (при необходимости и плотности  $\rho_1$ ) в дне. Из (2) очевидно, что собственные функции и собственные значения, а также локальные моды волновода будут случайными функциями  $r$ . Ранее было показано [10–12], что в нерегулярном волноводе в приближении рассеяния вперед амплитуды мод  $G_m(r)$  определяются следующим аналитическим видом решения ( $\kappa_m r \gg 1$ ):

$$G(r) = \{G_m(r)\} = A(r) \exp \left\{ \int_0^r [i\kappa(\xi) - (\kappa(\xi)V(\xi)\kappa^{-1}(\xi) - V^T(\xi))/2] d\xi \right\} b(0), \quad (3)$$

где  $\kappa(r)$  — диагональная матрица собственных значений  $\{\kappa_m(r)\}$ ,  $A(r) = (i/8\pi r)^{1/2} \kappa^{-1/2}(r) \kappa^{-1/2}(0)$ ;  $b(0) = \{\varphi_m(0, z_0) \kappa_m^{-1/2}(0)\}$  — вектор-столбец начальных амплитуд мод;  $\exp\{\dots\}$  — матричная экспонента. В (3)  $V(r)$  — матрица с элементами  $V_{mn}(r) = \int_0^{\infty} \frac{\varphi_m(r, z) \partial \varphi_n(r, z)}{\rho(r, z) \partial r} dz$ , а  $V^T(r)$  —

транспонированная матрица  $V$ . Последние матрицы описывают межмодовое взаимодействие из-за горизонтальных изменений, вызванных флуктуациями скорости звука в дне и случайной шероховатостью донной границы. Вычисляя поле давления  $p(r, z)$  согласно (2), (3) для каждой случайной реализации  $c_1(r)$  и  $H(r)$  из ансамбля  $N$  реализаций, нетрудно получить изменение средней интенсивности, или среднюю функцию потерь при распространении звука вдоль трассы в случайно-неоднородном волноводе:

$$\langle I \rangle = \langle |p|^2 \rangle = \sum_n \langle |G_n|^2 |\varphi_n|^2 \rangle + \sum_{(n \neq m)} \langle G_n G_m^* (\varphi_n \varphi_m^*) \rangle, \quad (4)$$

где угловые скобки означают статистическое усреднение, которое при расчетах заменяется на алгебраические формулы. Аналогично, по хорошо известным соотношениям, могут вычисляться и другие интересующие статистические характеристики интенсивности.

**Модель стохастического волновода.** Для проведения численного анализа была осуществлена привязка к значениям параметров, которые характерны для шельфовых зон арктических морей, в частности, Карского моря [4, 5]. Рассматривался мелководный волновод, в котором происходит распространение тонального звукового сигнала частоты 250 Гц. Волновод имеет среднюю глубину  $\langle H(r) \rangle = 40$  м, горизонтальную поверхность и шероховатое дно. В водном слое однородные профили скорости звука  $c = 1460$  м/с и плотности  $\rho = 1,023$  г/см<sup>3</sup>. Дно представляет собой жидкое поглощающее полупространство неконсолидированных осадков с показателем преломления на границе вода-дно  $n = (c/c_1)(1 + i\beta_1)$ ,  $\beta_1 = 0,02$ . В донных осадках, следуя данным измерений, приведенным в [4, 5], задаем импеданс посредством плотности,  $\rho_1(r) = \langle \rho_1 \rangle = 1,85$  г·см<sup>-3</sup>, и скорости звука  $c_1(r)$ , которая случайно изменяется вдоль трассы распространения сигнала. Случайный процесс  $c_1(r) = \langle c_1 \rangle + \delta c_1(r)$  полагаем гауссовым с экспоненциальной корреляционной функцией:  $B_{c_1}(r_2 - r_1) = \sigma_{c_1}^2 \exp(-|r_2 - r_1|/L_{rc})$ . Аналогично задаются флуктуации шероховатой границы раздела вода-осадки:  $H(r) = \langle H \rangle + \delta h(r)$  (см. вставки

на рис. 1, 2),  $B_h(r_2 - r_1) = \sigma_h^2 \exp(-|r_2 - r_1|/L_h)$ . Функция импеданса  $g_m(r)$  в граничном условии к (2) при постоянном  $c$  в водном слое определяется локальными значениями в поперечных сечениях волноводов сравнения Пекериса, или любых иных волноводов сравнения, если  $c = c(z)$ .

**Статистический анализ потерь при распространении.** Статистическое моделирование средней интенсивности (4) выполнено для мелководного волновода с сильно проницаемым дном:  $\langle c_1 \rangle = c = 1460$  м/с. В этом случае, как было показано в работах [13, 14] для объемных флуктуаций скорости звука в водном слое, а также для флуктуаций функции импеданса  $g_m(r)$  в [7], при распространении звукового сигнала наблюдается максимальный статистический эффект. На основании данных обработки работ [4, 5] характерный масштаб изменения неоднородностей  $L_{rc}$  выбран равным 1 км, а интенсивность флуктуаций  $\sigma_{c_1}^2 = \langle (\delta c_1 / \langle c_1 \rangle)^2 \rangle = 1,7 \cdot 10^{-3}$  (соответствует  $|\delta c_1| \approx 60$  м/с). Характерный масштаб изменения  $H(r)$  рассматривался  $L_h = 1$  км [15] и 100 м [1], а интенсивность флуктуаций  $\sigma_h^2 = \langle (\delta h)^2 \rangle = 1$  м<sup>2</sup>. В процессе численного моделирования для получения надежного статистического результата при усреднении рассмотрен ансамбль реализаций  $N = 10^3$ . Ниже на рис. 1, 2 представлены численные результаты.

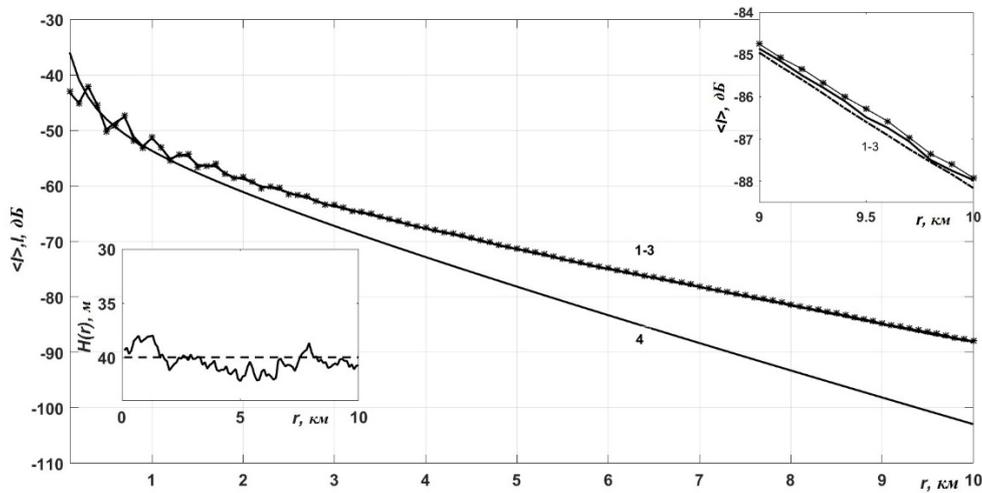


Рис. 1. Спадание средней интенсивности сигнала частоты 250 Гц в случайном волноводе с флуктуациями импеданса дна и донной границы (батиметрии).  $L_{rc} = L_h = 1$  км.

Кривые 1–3 — приближение рассеяния вперед, адиабатическое приближение (штриховая кривая), горизонтальная донная граница  $H$  (маркеры); нижняя кривая 4, усредненная по масштабу интерференции, соответствует детерминированному волноводу ( $\delta c_1 = \delta h = 0$ ).  $z = z_0 = 24$  м.

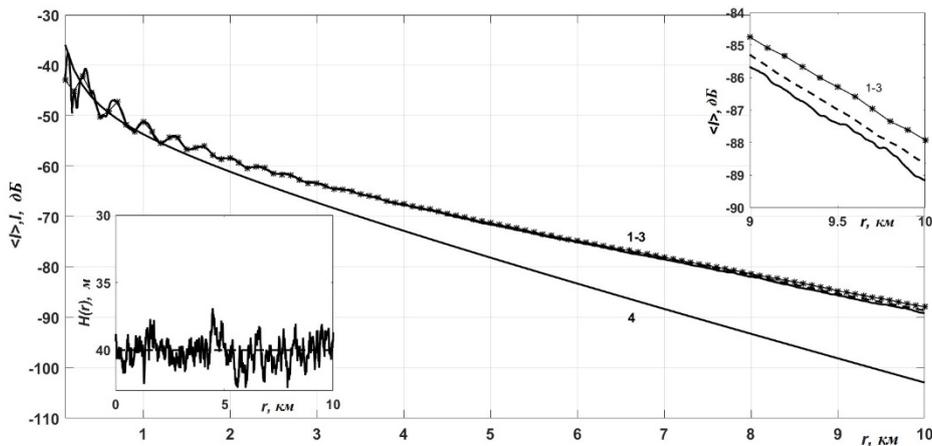


Рис. 2. Аналогично рис. 1, но шероховатости донной границы меньшего масштаба  $L_h = 100$  м.

Из кривых, представленных на рис. 1, 2, видно, что флуктуации  $\delta c_1$  приводят к замедлению спада средней интенсивности с дистанцией. На расстоянии 10 км от источника это замедление составляет 13–14 дБ [7] при масштабе  $L_{rc} = 1$  км, и еще больше при увеличении масштаба  $L_{rc}$ . В то же время флуктуации границы  $\delta h(r)$ , которые, как известно из литературы, рассеивают сигнал, увеличивают потери при распространении. Однако данный эффект в низкочастотной области оказывается весьма мал, составляя десятые доли децибела для масштаба неоднородностей  $L_h = 1$  км (вставка в верхнем правом углу графика на рис. 1). Некоторое усиление эффекта до 1 дБ к расстоянию 10 км наблюдается для масштаба  $L_h = 100$  м (см. рис. 2 и вставку в верхнем правом углу графика). В этом случае возрастает как рассеяние («адиабатическая» кривая), так и межмодовое взаимодействие, из-за чего акустическая энергия интенсивнее уходит из водного слоя в донные осадки. Таким образом установлено, что флуктуации импеданса дна (неоднородностей в подстилающих осадках) в среднем намного сильнее влияют на энергетические потери сигнала при распространении, нежели шероховатость сильно проницаемой донной границы. Этот результат также справедлив для влияния объемных случайных неоднородностей скорости звука, присутствующих в водной толще мелкого моря [7, 12–14]. Основной вывод состоит в том, что случайными шероховатостями проницаемой донной границы при распространении низкочастотного (сотни герц и ниже) звука в типичных условиях мелкого моря можно пренебречь по сравнению с влиянием объемных неоднородностей, если не интересоваться тонкими эффектами изменения интерференционной структуры акустического поля.

#### *Литература*

1. Tracey V. H., Schmidt H. Seismo-acoustic field statistics in shallow water // IEEE Journ. of Ocean. Eng. 1997. Vol. 22, № 2. P. 317–331.
2. Stotts S. A., Knobles D. P., Koch R. A. Scattering in a Pekeris waveguide from a rough bottom using a two-way coupled mode approach // J. Acoust. Soc. Am. 2011. Vol. 129, № 5. EL172–178.
3. Stotts S. A., Knobles D. P., Koch R. A. Scattering in a Pekeris waveguide from a rough bottom using a two-way coupled mode approach // Proc. Mtgs. Acoust. 2011. Vol. 12. 070007.
4. Григорьев В. А., Петников В. Г., Росляков А. Г., Терехина Я. Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 3. С. 342–358.
5. Волков М. В., Григорьев В. А., Луньков А. А., Петников В. Г. Неоднородное поле скорости звука в дне Карского моря и его влияние на распространение акустических волн // Тр. XXXII Сессии РАО. 2019. С. 266–272.
6. Гулин О. Э., Ярошук И. О. Потери при распространении низкочастотного звука в мелком море с горизонтально-неоднородным случайным импедансом дна // Тр. Всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». 2020. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, С. 370–373.
7. Zhu F., Gulin O. E., Yaroshchuk I. O. Average intensity of low-frequency sound and its fluctuations in a shallow sea with a range-dependent random impedance of the liquid bottom // Appl. Sci. 2021. № 11. P. 11575.
8. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
9. Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics. Springer: New York, NY, USA; Dordrecht, The Netherlands; Heidelberg, Germany; London, UK, 2011.
10. Гулин О. Э. К расчетам низкочастотных акустических полей в нерегулярных волноводах при наличии сильного обратного рассеяния // Акуст. журн. 2008. Т. 54, № 4. С. 575–586.
11. Gulin O. E. The contribution of a lateral wave in simulating low-frequency sound fields in an irregular waveguide with a liquid bottom // Acoust. Phys. 2010. Vol. 56, № 5. P. 613–622.
12. Гулин О. Э., Ярошук И. О. Особенности энергетической структуры акустических полей в океане с двумерными случайными неоднородностями // Акуст. журн. 2017. Т. 63, № 2. С. 158–164.
13. Гулин О. Э., Ярошук И. О. Зависимость средней интенсивности низкочастотного акустического поля от параметров дна мелкого моря с объемными случайными неоднородностями водного слоя // Акуст. журн. 2018. Т. 64, № 2. С. 186–189.
14. Zhu F., Gulin O. E., Yaroshchuk I. O. Statistical patterns of transmission losses of low-frequency sound in shallow sea waveguides with Gaussian and non-Gaussian fluctuations // Appl. Sci. 2019. № 9. P. 1841.
15. Tang X., Tappert F. D., Creamer D. B. Simulations of large acoustic scintillations in the Straits of Florida // J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 120, № 6. P. 3539–3552.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана», номер гос. регистрации: АААА-А20-120021990003-3.

## ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАВИТАЦИОННЫХ ПОРОГОВ ВО ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Н. П. Мельников, канд. физ.-мат. наук

Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

## TEMPORARY VARIABILITY OF CAVITATION THRESHOLDS IN THE FRONTAL ZONE OF THE NORTHWESTERN PACIFIC OCEAN

N. P. Melnikov, Ph.D.

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

*В работе приводятся экспериментальные результаты натурных измерений кавитационных порогов морской воды, полученные в Субарктической фронтальной зоне Тихого океана, ограниченной координатами 38°–42° с.ш. и 150°–157° в.д. в рамках эксперимента «Мегаполигон» в период с 28 марта по 7 апреля 1989 г. на НИС «Академик Александр Виноградов». Пространственное распределение величин кавитационных порогов имеет сложный ячеистый характер. Анализ временной изменчивости кавитационных порогов показал наличие устойчивой суточной зависимости, причем в дневное время суток (с 10 до 16 ч) средние величины кавитационной прочности приблизительно в 2 раза превышают средние «ночные» величины.*

*The paper presents experimental results of field measurements of cavitation thresholds of sea water obtained in the Subarctic frontal zone of the Pacific Ocean, limited by coordinates 38°–42° N and 150°–157° E within the framework of «Megapolygon» experiment in the period from the 28<sup>th</sup> of March to the 7<sup>th</sup> of April 1989 on the Research vessel «Academician Alexander Vinogradov». The spatial distribution of the values of cavitation thresholds has a complex cellular character. An analysis of the temporal variability of cavitation thresholds showed the presence of a stable daily dependence, and in the daytime (from 10 to 16 hours) the average values of cavitation strength are approximately 2 times higher than the average «night» values.*

В современной литературе кавитацией принято называть сложный комплекс разнообразных физико-химических явлений, сопровождающих нелинейные пульсации пузырьков, возникающих в жидкости из микро неоднородностей под действием переменных полей давления. По характеру действующих на жидкость сил кавитацию условно подразделяют на гидродинамическую и акустическую. Акустическая кавитация возникает при возбуждении в жидкости достаточно интенсивных акустических полей. Гидродинамическая кавитация возникает при уменьшении давления в жидкости в гидродинамических полях, обтекаемых тел. Основное отличие акустической кавитации от гидродинамической состоит в том, что в первом случае объем жидкости подвергается периодическому воздействию переменного давления в течение длительного интервала времени. Однако, процессы, протекающие при гидродинамической и акустической кавитации, обусловлены одними и теми же физическими законами. В связи с этим в некоторых случаях акустическая кавитация может служить для моделирования явлений гидродинамической кавитации.

Любая жидкость имеет значительно меньшую прочность на разрыв в сравнении с прочностью её межмолекулярных связей [1]. Такое свойство жидкостей связано с присутствием в ней неких «слабых мест», обычно называемых «зародышами кавитации». Отсутствие обоснованной теории стабилизации кавитационных зародышей создает значительные трудности в теоретических и экспериментальных исследованиях процессов возникновения и развития кавитации. В связи с этим получило распространение «феноменологическое» описание явления кавитации, не учитывающее механизмов образования и стабилизации зародышей. В рамках такого рассмотрения, реальная жидкость представляется в виде гипотетической среды — жидкость плюс стабильно существующие или постоянно образующиеся микронеоднородности, физическая природа, распределение по пространству, по размерам и концентрация которых постулируется в каждой конкретной ситуации или используются данные реальных измерений «зародышей кавитации» [2, 3].

Согласно общепринятому представлению кавитационная прочность является физической характеристикой жидкости и однозначно зависит от её физико-химических свойств. Экспериментальные значения величины кавитационной прочности, полученные различными авторами [4–6] имеют значительные расхождения. По-видимому, это связано с тем, что сам

процесс измерения и измерительная система неизбежно изменяют характеристики жидкости, в частности, размеры кавитационных зародышей и их функции распределения по размерам и по пространству. Поэтому, в случае акустической кавитации, принято говорить не о «кавитационной прочности», а о «кавитационном пороге». Величина кавитационного порога зависит как от среды (жидкость с парогазовыми или другими зародышами кавитации), так и от измерительной системы (акустические концентраторы, гидрофоны и другие измерительные средства), а также, как от методики измерения (в частности, от критерия возникновения кавитации), так и от характера акустического воздействия (особенно от характера распределения амплитуд акустического поля и его частоты).

Концентрация зародышей кавитации и их распределение по размерам и по пространству должны определять величину прочности невозмущенной жидкости. При приложении к жидкости растягивающего напряжения или переменного поля давления эти зародыши кавитации могут превращаться в паровые или газопаровые каверны или пузырьки. При достижении величины давления некоторой критической величины в жидкости возникает кавитация. Кавитационная прочность реальных жидкостей изменяется в широких пределах в зависимости от физических свойств и состояния среды. При этом прочность является статистической величиной, что обусловлено случайным характером распределения зародышей в жидкости по размерам и по пространству. В силу естественной неоднородности и нестационарности параметров состояния и различия физико-химических и биологических характеристик морской воды в различных районах Мирового океана, существенных для свойств содержащихся в ней зародышей, прочность морской воды характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью [7–9].

В связи с тем, что известные лабораторные способы, применяемые при исследовании прочности, перенести в натурные условия очень сложно, используется методика, основанная на измерениях не самой прочности, а порога кавитации, который служит мерой кавитационной прочности жидкости, характеризующий момент появления неустойчивых кавитационных полостей.

Под порогом акустической кавитации  $P_{mk}$  в работе принята амплитуда звукового давления в момент возникновения кавитации.

Все измерения кавитационных порогов морской воды производились по единой методике. Методика измерений кавитационной прочности морской воды в различных районах Мирового океана, экспериментальная установка для её измерений, а также критерии возникновения кавитации рассмотрены в [8].

В 14-м рейсе НИС «Академик Александр Виноградов» с 28 мая по 7 апреля 1989 г. в Северо-западной части Тихого океана, в районе Субарктической фронтальной зоны были проведены комплексные измерения различных параметров морской воды, в том числе измерения кавитационных порогов. В этом районе параллельно друг другу расположены южное течение Курисио и северное течение Оясио, воды которых движутся в восточном направлении. Границы межфронтальной зоны динамически подвижны. Внутри зоны находятся субтропические и субарктические воды, которые смешиваются в разных пропорциях и разделяются вторичными фронтами. Согласно гидрологическим измерениям, строение субарктической фронтальной зоны имеет хорошо выраженную двухфронтальную структуру. На рис. 1, колонка А представлены изолинии величины кавитационных порогов на глубинах:  $a$  — 5 м;  $b$  — 10 м;  $c$  — 25 м;  $d$  — 70 м. На всех глубинах отчетливо видна двухфронтальная структура распределения кавитационной прочности морской воды. Однако пространственная изменчивость величины кавитационной прочности существенно меняется от горизонта к горизонту. Даже на близких горизонтах 70 и 50 м в северной части полигона имеется существенное различие: область повышенной прочности на горизонте 70 м, на горизонте 50 м превращается в две области, разделенные узкой полосой пониженных величин кавитационных порогов. А на глубинах 25 м и 10 м эта часть полигона имеет одну область повышенной кавитационной прочности. Области повышенных значений в северной и южной части полигона на всех горизонтах разделены широкой полосой малых значений кавитационной прочности. Ширина этой полосы имеет существенные размеры: от 37°с.ш. до 39°с.ш. Очевидно, что эта часть полигона представляет собой трансформированные воды субарктической и субтропической структур.

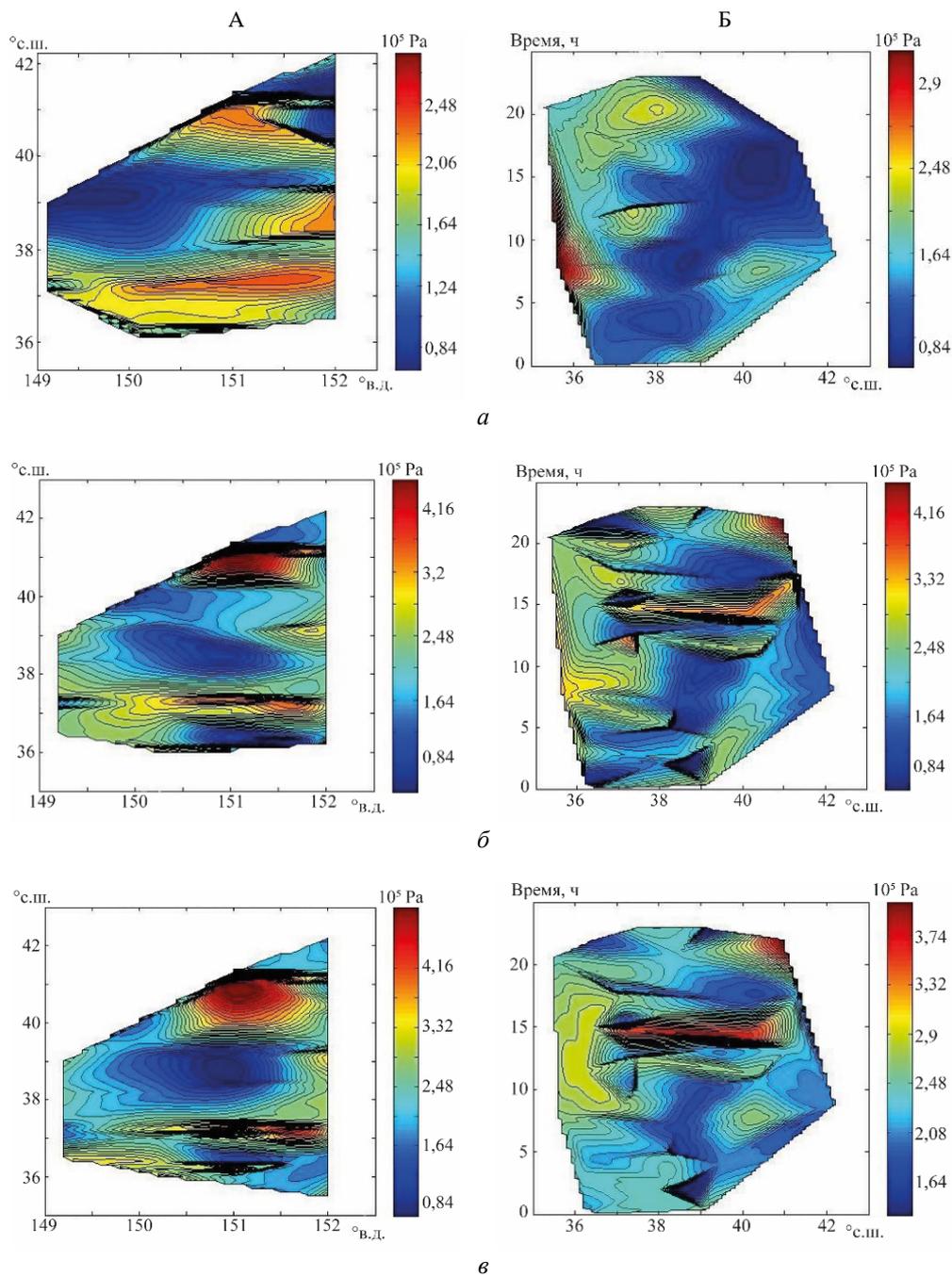


Рис. 1. Пространственная и временная изменчивость кавитационных порогов.

*a* — изолинии,  $P_{mk}, h = 5$  м; *б* — изолинии,  $P_{mk}, h = 10$  м; *в* — изолинии,  $P_{mk}, h = 25$  м;  
*г* — изолинии,  $P_{mk}, h = 50$  м; *д* — изолинии,  $P_{mk}, h = 70$  м; пространственная изменчивость — колонка А;  
 временная изменчивость — колонка Б.

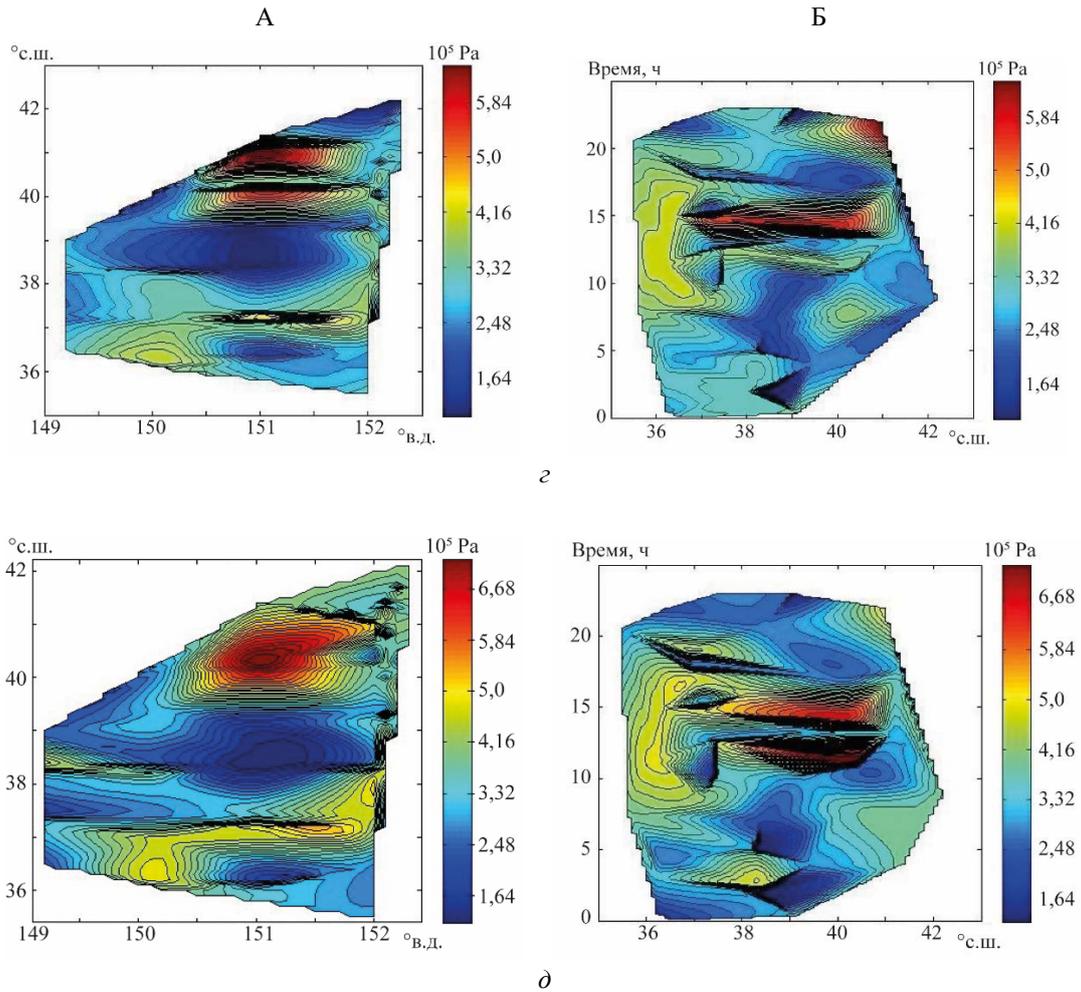


Рис. 1 — продолжение.

На такую сложную пространственную изменчивость кавитационных порогов накладывается ее временная изменчивость, которая всегда присутствует и связана с суточной изменчивостью концентрации зародышей кавитации в морской воде. Для определения временной изменчивости кавитационной прочности все значения ее величины на всем полигоне были расположены по времени в течении суток от нуля до двадцати четырех часов, независимо от даты проведения измерений. На рис. 1, колонка Б представлены изолинии величин кавитационных порогов на горизонтах: *a* — 5 м; *b* — 10 м; *в* — 25 м; *г* — 50 м; *д* — 70 м. Временная изменчивость кавитационной прочности имеет сложный характер, но в интервале времени приблизительно от 10:00 до 16:00 ч на всех горизонтах имеет место значительное увеличение величины кавитационной прочности, до 3,5 раз. Такая временная зависимость кавитационных порогов может быть обусловлена суточной миграцией зародышей кавитации, связанной с вертикальной миграцией зоопланктона с «глубины» на поверхность и обратно в течении суток. Поведение мигрирующих организмов не только весьма многообразно, но и сложное. Кушинг [10] в процессе вертикальных суточных миграций различает 5 стадий. В первой стадии начинается подъем с «дневной» глубины за два часа перед заходом солнца или даже за 10 ч. Вторая стадия характеризуется уходом с поверхности вглубь в полночь или перед этим. В третьей стадии происходит возвращение к поверхности перед рассветом после полуночного опускания. Четвертая стадия — быстрый уход на дневную глубину с началом проникновения света в воду. В пятой стадии изменяется уровень дневной глубины не только по дням, но и по часам. Поведения родов, видов или одного и того же вида в различные периоды его жизни, в разные сезоны обнаруживается удивительное разнообразие суточного цикла с отклонением от общей схемы и даже аномалии в поведении.

Такое поведение зоопланктона обеспечивает разнообразие в изменчивости кавитационной прочности, что отчетливо проявляется на разных глубинах (рис. 1, колонка Б). Картина неоднородна, так на глубине 70 м область повышенных значений кавитационной прочности, простирающаяся от 37°с.ш. до 41°с.ш. во временном интервале 12:00–14:00 ч прорезана полосой малых значений. На горизонте 50 м эта область более однородна. На остальных горизонтах (25 м и 10 м) эта область более широкая во времени.

Таким образом суточные миграции планктона обеспечивают и суточную изменчивость кавитационной прочности морской воды.

#### *Литература*

1. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей // М.: ГИТТЛ. 1951.
2. Akulichev V. A., Bulanov V. A. Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // J. Acoust. Soc. America. 2011. Vol. 130, № 5. P. 3438-3449.
3. Буланов В. А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей // Владивосток: Дальнаука, 2001/ 278 с.
4. Рой Н. А. Обзор. Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации // Акуст. жур. 1957. Т. 3, №1, С. 3–18.
5. Акуличев В. А., Ильичев В. И. Пороги акустической кавитации в морской воде в различных районах Мирового океана. // Акуст. жур. 2005. Т. 51, № 2. С. 167–179.
6. Ильичев В. И., Елистратов В. П., Корец В. Л., Мельников Н. П. Широтная изменчивость кавитационной прочности морской воды // Докл. РАН. 1992. Т. 324, № 5. С. 1108–1110.
7. Мельников Н. П., Елистратов В. П. Временная изменчивость кавитационных порогов морской воды // Уч. зап. физ. факультета Московского университета. 2014. № 6. С. 1–7.
8. Мельников Н. П., Елистратов В. П. Мезомасштабная пространственная изменчивость кавитационных порогов морской воды // Акуст. жур. 2017. Т. 63, №2. С.187–195.
9. Акуличев В. А., Буланов В. А. Акустические исследования мелкомасштабных неоднородностей в морской воде. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 411 с.
10. Cushing B. H. The vertical migration of planktonic crustacea // Biological Reviews-Cambridge Philosophical Society. 2008. Vol. 26. Iss. 2. P. 158–192.

## ОПТИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ПРИ НАКЛОННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Г. А. Федотов, д-р техн. наук

АО «Морские неакустические комплексы и системы», Санкт-Петербург, Россия

## OPTIMAL CONFIGURATION OF PRESSURE SENSORS IN AN INCLINED ORIENTATION OF A HYDROSTATIC MARINE DENSITY METER

G. A. Fedotov, Dr.Sc.

JSC «Marine Non-acoustic Complexes and Systems», St. Petersburg, Russia

*Рассмотрен измеритель плотности морской воды, образованный четырьмя датчиками давления, расположенными в вершинах правильной треугольной пирамиды. Получены алгебраические выражения и построены графики, позволяющие определить оптимальный (минимизирующий погрешность определения плотности) угол при вершине пирамиды в зависимости от угла наклона измерителя в морской среде.*

*A sea water density meter formed by four pressure sensors located at the vertices of a regular triangular pyramid is considered. Algebraic expressions are derived and graphs that allow determining the optimal (minimizing the error in determining the density) angle at the top of the pyramid, depending on the angle of the meter in the marine environment are constructed.*

Данная работа является продолжением работ [1–5], в которых была предложена и исследована новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды. Метод основан на совместной обработке сигналов четырёх жёстко конфигурированных датчиков давления. Важная положительная особенность предложенного метода заключается в том, что выходной сигнал системы не зависит от ее пространственной ориентации в поле силы тяжести. Метод позволяет определять плотность морской среды в реальном времени по измеренным значениям гидростатического давления при условии, что известны параметры, характеризующие пространственную конфигурацию входов индивидуальных датчиков давления, образующих систему. При этом не требуется проводить измерения никаких других гидрофизических полей морской среды, кроме поля давления.

Рассмотрим гидростатический измеритель, образованный четырьмя датчиками давления. Пусть три датчика из четырёх, образующих систему, лежат в вершинах основания правильной треугольной пирамиды, а четвёртый (под номером ноль) расположен в её вершине (рис. 1). Угол при вершине пирамиды равен  $\alpha$  ( $\alpha$  можно назвать углом при вершине гидростатического измерителя), длина боковых ребер равна  $l$ ,  $P_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ) — сигналы датчиков давления. Тогда искомая плотность морской среды определяется следующим образом:

$$\rho = \frac{G}{g}, \quad (1)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $|\text{grad}P| \equiv G$  — модуль градиента гидростатического давления, который вычисляется по измеренным значениям разностей сигналов датчиков давления  $\delta P_i \equiv P_i - P_0$  ( $i = 1, 2, 3$ ):

$$G = \sqrt{\frac{(1+c)(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2) - 2c(b_1b_2 + b_1b_3 + b_2b_3)}{(1-c)(1+2c)}}. \quad (2)$$

Здесь  $b_i = \delta P_i / l$ ,  $l$  — расстояние между нулевым и тремя остальными датчиками (длина бокового ребра пирамиды);  $\alpha$  — угол при вершине пирамиды,  $c \equiv \cos \alpha$ . Пусть также, ради простоты и наглядности, датчики давления идентичны, а погрешности величин  $b_i$  одинаковы

для всех трех пар датчиков и равны  $\Delta b$ . Введем в рассмотрение безразмерную функцию  $F$ , характеризующую величину  $\Delta G$  — погрешность определения величины  $G$ :

$$F \equiv \frac{\Delta G}{\Delta b}. \quad (3)$$

Величина  $\Delta G$  – погрешность определения модуля вектора градиента гидростатического давления в воде, входящего в рабочую формулу метода (1) – является основным источником ошибки определения  $\rho$ .

На рис. 1 изображен вектор  $\vec{h}$ , соединяющий вершину правильной пирамиды и центр ее основания (равностороннего треугольника 123). Обозначим через  $\varphi$  угол между векторами  $\vec{h}$  и  $\vec{g}$  (рис. 1). Тогда можно показать [2], что выражение (3) для погрешности определения модуля градиента гидростатического давления принимает следующий вид:

$$F(\alpha, \varphi) = \sqrt{\frac{1 - c + 3c \sin^2 \varphi}{(1 - c)(1 + 2c)}}. \quad (4)$$

Графики функции  $F(\alpha)$  для нескольких значений  $\varphi$  приведены на рис. 2. Первый график соответствует параллельности векторов  $\vec{h}$  и  $\vec{g}$  (рис. 1, а), последний (седьмой) график — перпендикулярности  $\vec{h}$  и  $\vec{g}$ . Пять промежуточных вариантов соответствуют наклонной ориентации гидростатического измерителя, качественно изображённой на рис. 1, б. Из этих графиков следует, что для разных значений угла  $\varphi$  функции  $F(\alpha)$  достигают минимума (то есть погрешность определения  $G$ , а значит и  $\rho$ , минимальна) при разных значениях  $\alpha = \alpha_0$ . Цель данной работы — получить аналитические и графические выражения, позволяющие оценить зависимость  $\alpha_0(\varphi)$ . Значение  $\alpha_0$ , при котором  $F(\alpha) = \min$  для данного  $\varphi$  (в том числе при  $\varphi \rightarrow 90^\circ$ ), определяется из условия

$$\frac{dF}{d\alpha}(\alpha, \varphi) = 0. \quad (5)$$

Графики функций  $\frac{dF}{d\alpha}(\alpha)$  для различных значений  $\varphi$ , иллюстрирующие существование решений уравнения (5), приведены на рис. 3. Решение уравнения (5) относительно  $\alpha$  имеет вид

$$\alpha_0(\varphi) = \arccos \frac{\sqrt{2K(3-K)} - 2}{2(K-1)}, \quad (6)$$

где  $K = 3 \sin^2 \varphi$ .

График функции  $\alpha_0(\varphi)$  для интервала  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  представлен на рис. 4. Для построения графиков в других областях, на всём интервале  $-180^\circ < \varphi < 180^\circ$ , можно воспользоваться свойствами функции  $\alpha_0(\varphi)$ , а именно, её четностью и тем, что  $\alpha_0(\varphi) = \alpha_0(\pi - \varphi)$ .

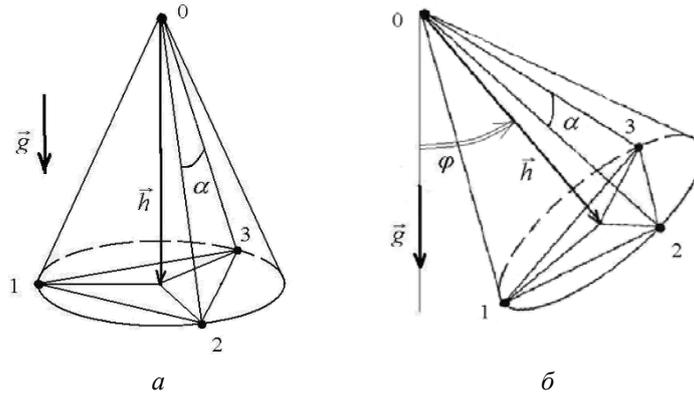


Рис. 1. Два варианта пространственной ориентации системы датчиков давления.

*a* — вертикальная ориентация системы датчиков; *b* — наклонная ориентация.

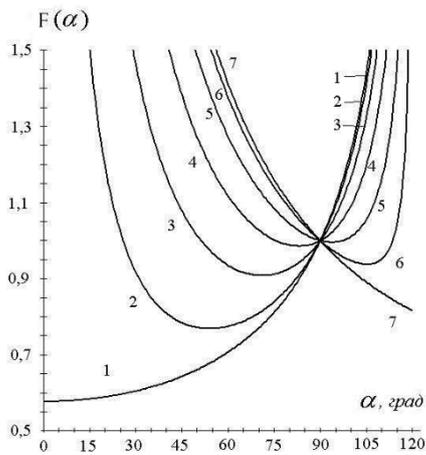


Рис. 2. Графики функции  $F(\alpha)$  для различных значений угла  $\varphi$ .

1 —  $0^\circ$ ; 2 —  $15^\circ$ ; 3 —  $30^\circ$ ; 4 —  $45^\circ$ ; 5 —  $60^\circ$ ;  
6 —  $75^\circ$ ; 7 —  $90^\circ$ . Пояснения в тексте.

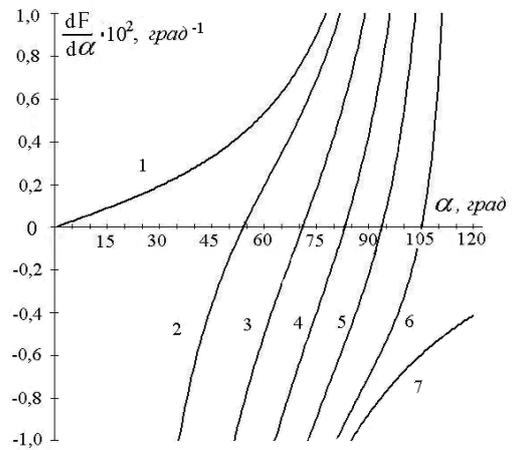


Рис. 3. Графики функции  $\frac{dF}{d\alpha}(\alpha)$  для различных значений угла  $\varphi$ .

1 —  $0^\circ$ ; 2 —  $15^\circ$ ; 3 —  $30^\circ$ ; 4 —  $45^\circ$ ; 5 —  $60^\circ$ ;  
6 —  $75^\circ$ ; 7 —  $90^\circ$ . Пояснения в тексте.

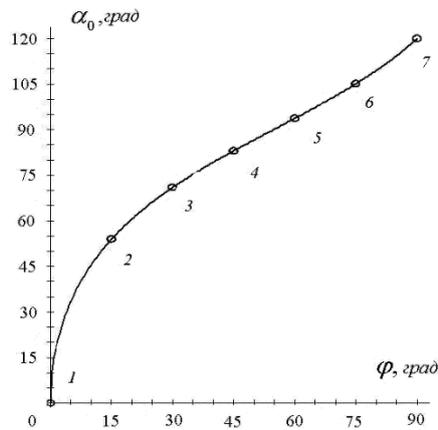


Рис. 4. Зависимость оптимального угла при вершине гидростатического измерителя от угла наклона измерителя в поле силы тяжести.

Точки на кривой соответствуют характерным значениям угла  $\varphi$ :  
1 —  $0^\circ$ ; 2 —  $15^\circ$ ; 3 —  $30^\circ$ ; 4 —  $45^\circ$ ; 5 —  $60^\circ$ ; 6 —  $75^\circ$ ; 7 —  $90^\circ$ .

Таким образом, в данной работе получены аналитические выражения и приведены графики, позволяющие оценить оптимальную (с точки зрения минимизации погрешности определения плотности морской воды) конфигурацию датчиков давления, образующих гидростатический измеритель (а именно, угол при вершине правильной треугольной пирамиды, в вершинах которой расположены датчики), при наклонной ориентации измерителя в морской среде. Полученная информация способствует расширению функциональных возможностей гидростатического метода определения плотности морской воды. Количественные оценки положительного эффекта от использования полученных данных являются темой самостоятельного исследования.

#### *Литература*

1. Федотов Г. А. Новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды / Г. А. Федотов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 1. С. 58–65.
2. Федотов Г. А. О точности определения плотности морской воды с помощью новой модификации гидростатического метода // *Тр. XIII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. 2016. № 13. С. 205–208.
3. Федотов Г. А. Оценка точности определения плотности морской воды при неконтролируемой ориентации гидростатического измерителя //: *Тр. XIV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. 2018. С. 275–277.
4. Федотов Г. А. О некоторых особенностях новой модификации гидростатического метода определения плотности морской воды // *Тр. XV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. 2020. С. 284–287.
5. Патент № 2747854 С2 Российская Федерация, МПК G01N 9/26. Способ измерения плотности морской воды с подвижного носителя гидрофизической аппаратуры: № 2020116797: заявл. 18.05.2020: опубл. 17.05.2021 / Л. Б. Гусев, Г. А. Федотов.

## СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ ОДНОРАЗОВЫХ ОБРЫВНЫХ ЗОНДОВ

П. В. Дорохов, канд. техн. наук, В. Н. Логачев, Ф. Б. Овчинников, К. А. Румянцев  
АО «Морские неакустические комплексы и системы», Санкт-Петербург, Россия

## SYSTEM FOR MEASURING HYDROLOGICAL PARAMETERS USING DISPOSABLE BREAKAWAY PROBES

P. V. Dorokhov, Ph.D., V. N. Logachev, F. B. Ovchinnikov, K. A. Rumyantsev  
JSC «Marine Non-acoustic Complexes and Systems», St. Petersburg, Russia

*Представлена разработанная АО «Морские неакустические комплексы и системы» автоматическая система измерения гидрологических параметров морской среды (электропроводность, температура, давление) и определения на их основе профилей вертикального распределения плотности, солёности и скорости звука. Данная система включает в себя обрывные (теряемые) зонды, а также базовый (эталонный) гидрологический прибор. Предложены алгоритмы автоматической калибровки системы и построения вертикальных профилей измеряемых и расчетных величин. Приведены результаты натурной отработки системы в различных акваториях Мирового океана.*

*An automatic system developed by JSC «Marine Non-acoustic Complexes and Systems» for measuring the hydrological parameters of the marine environment (electrical conductivity, temperature, pressure) and determining on their basis the profiles of the vertical distribution of density, salinity and sound velocity is presented. This system includes breakaway (lost) probes, as well as a basic (reference) hydrological device. Algorithms for automatic calibration of the system and the construction of vertical profiles of measured and calculated values are proposed. The results of full-scale testing of the system in various waters of the world ocean are presented.*

**Введение.** Важнейшей задачей исследования Мирового океана является измерение вертикальных распределений гидрофизических полей (далее — ВРГП) электрической проводимости, температуры, плотности, солёности и скорости звука в его акваториях [1]. Данные измерения позволяют формировать и актуализировать базы гидрологических данных и на их основе отслеживать глобальные процессы, влияющие на климат планеты. В этой связи особое внимание уделяется не только количеству проводимых измерений, но и их достоверности и точности. В данном докладе рассмотрена автоматическая система измерения гидрологических параметров с помощью одноразовых обрывных зондов (далее — система регистрации ВРГП), разработанная АО «Морские неакустические комплексы и системы» и предназначенная для измерений температуры, удельной электрической проводимости, гидростатического давления, расчета солёности, плотности морской воды и скорости распространения звука в морской воде с помощью одноразовых обрывных зондов (далее — зонд) до глубины 1000 м.

**Описание и основные характеристики разработанной системы.** Система регистрации ВРГП (см. рис. 1) состоит из зонда, непосредственно выполняющего измерения гидрологических параметров морской воды, базового гидрологического прибора (далее — прибор БГ) необходимого для предпусковой калибровки зонда и блока терминального, отвечающего за индикацию автоматического контроля и режимов работы системы. Информация, получаемая при помощи системы регистрации ВРГП, принимается, обрабатывается и отображается на ЭВМ с установленным специализированным программным обеспечением.

Основной особенностью данной системы является то, что зонд содержит в своём составе простые датчики температуры, удельной электрической проводимости и гидростатического давления, в то время как прибор БГ содержит в своём составе аналогичный набор высокоточных датчиков. Градуировочные характеристики измерительных каналов зонда и прибора БГ линейны во всем рабочем диапазоне, но градуировочная характеристика зонда менее стабильна и со временем появляется смещение относительно ее первоначального положения. С учётом этого, для повышения качества информации получаемой системой регистрации ВРГП в целом, в системе предусмотрена предпусковая калибровка зонда относительно прибора БГ, позволяющая скорректировать градуировочные коэффициенты датчиков зонда непосредственно перед пуском. После проведения предпусковой подготовки производится сброс зонда. Данные от зонда в реальном времени передаются на ЭВМ, обрабатываются специальными алгоритмами и

отображаются в специализированном программном обеспечении. Частота опроса измерительных каналов зонда составляет 5 Гц, что при скорости погружения зонда в 5 м/с позволяет получать отсчёты о вертикальном распределении гидрологических параметров морской среды по глубине с шагом в один метр.

Данная структурная особенность системы регистрации ВРГП позволяет существенно снизить стоимость её эксплуатации, за счёт использования в зонде простых в изготовлении первичных измерительных преобразователей, без ухудшения качества получаемой гидрологической информации.

Метрологические характеристики системы регистрации ВРГП, полученные при испытаниях в целях утверждения типа средства измерения, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метрологические характеристики системы регистрации ВРГП

| Параметр                                           | Диапазон измерения                | Погрешность                 |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| Прямые измерения                                   |                                   |                             |
| Удельная электрическая проводимость, См/м          | от 1,1 до 7,0 См/м                | $\pm 0,005$ См/м            |
| Температура, °С                                    | от минус 2 до плюс 35 °С          | $\pm 0,02$ °С               |
| Гидростатическое давление, МПа                     | от 0 до 10 МПа                    | $\pm 0,025$ МПа             |
| Косвенные измерения                                |                                   |                             |
| Плотность морской воды, кг/см <sup>3</sup>         | от 1012 до 1038 кг/м <sup>3</sup> | $\pm 0,2$ кг/м <sup>3</sup> |
| Солёность морской воды, ПЭС                        | от 14 до 38 ПЭС                   | $\pm 0,05$ ПЭС              |
| Скорость распространения звука в морской воде, м/с | от 1410 до 1560 м/с               | $\pm 0,5$ м/с               |

Качественные характеристики разработанной системы регистрации ВРГП обусловлены точным выполнением метрологических и общих технических требований, а также соблюдением стандартизованных методик выполнения измерений.



Рис. 1. Система регистрации ВРГП.

**Алгоритмы обработки.** С целью автоматизации процесса контроля функционирования, калибровки и обработки информации в специализированном программном обеспечении системы регистрации ВРГП заложены следующие алгоритмы обработки информации:

1. Алгоритм контроля достоверности информации от зонда.

При работе алгоритма анализируются сигналы, поступающие от зонда для выявления кода фатальной ошибки. Сигналы от зонда полученные после момента выявления кода фатальной ошибки помечаются как не достоверные и далее не обрабатываются.

2. Алгоритм исправления ошибок преобразования.

При работе алгоритма анализируются сигналы, поступающие от зонда для выявления кода критической ошибки. При выявлении критической ошибки в сигналы данных от зонда, значения текущего отсчета полагаются равными усредненным значениям предыдущего и последующего отсчетов.

3. Алгоритм разбиения сигналов от прибора БГ и зонда на калибровочные сигналы и сигналы данных.

При работе алгоритма сигналы от прибора БГ и зонда разбиваются на два участка — до и после момента начала сброса зонда. Сигналы измерительных каналов прибора БГ, непосредственно предшествующие моменту сброса зонда, используются для градуировки соответствующих каналов зонда, а сигналы после момента сброса используются как сигналы данных для выделения участка спуска зонда, расчёта гидрологических параметров и построения их вертикального распределения.

4. Алгоритмы преобразования сигналов в физические величины.

При работе алгоритма данные от прибора БГ и зонда переводятся в физические величины с учетом индивидуальных градуировочных характеристик и коэффициентов преобразования, хранящихся в их памяти, для соответствующих измерительных каналов температуры, удельной электрической проводимости и гидростатического давления.

5. Алгоритм определения градуировочных коэффициентов.

При работе алгоритма производится вычисление разностей калибровочных сигналов значений температуры, удельной электрической проводимости и гидростатического давления полученных с датчиков зонда и прибора БГ, которые далее используются как градуировочные коэффициенты для компенсации систематических погрешностей датчиков температуры, удельной электрической проводимости и гидростатического давления зонда, выявленных на момент пуска.

6. Алгоритм выделения участка спуска зонда.

Алгоритм выделения участка спуска зонда основан на определении момента, при котором величина изменения гидростатического давления, регистрируемого датчиком гидростатического давления зонда за определенный интервал времени превысит заданное фиксированное пороговое значение, т.е. начнётся погружение зонда. Конец участка спуска определяется либо по моменту прекращения приёма данных от зонда (обрыв проводной линии связи), либо, когда величина изменения гидростатического давления регистрируемого датчиком зонда за определенный интервал времени станет меньше другого фиксированного порогового значения (зонд упал на грунт).

7. Алгоритм расчета глубины погружения зонда.

Алгоритм расчета глубины основан на реализации функциональной связи глубины с гидростатическим давлением с учетом широты места проведения зондирования [2], при этом значения гидростатического давления используются из данных от зонда на участке его спуска, а значение географической широты получают автоматически от корабельных навигационных средств непосредственно перед постановкой зонда или вводятся вручную оператором.

8. Алгоритмы расчета гидрологических параметров морской воды.

Расчет гидрологических параметров морской воды (солёности, плотности и скорости распространения звука в морской воде) осуществляется по стандартизованным алгоритмам [3–5] на участке спуска зонда.

9. Алгоритм скользящего усреднения гидрологических параметров морской воды для визуализации на экране ЭВМ.

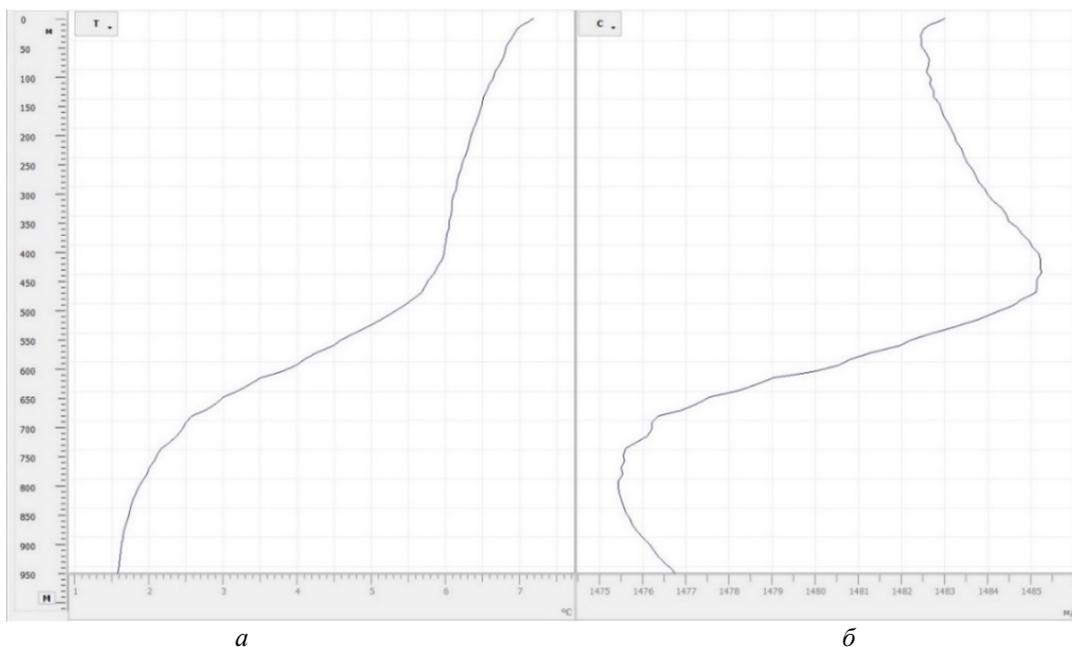


Рис. 2. Графики температуры (а) и скорости распространения звука (б).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Для визуализации на экране ЭВМ графиков вертикального распределения гидрологических параметров морской воды производится скользящее (по глубине) усреднение гидрологических параметров.

Выполнение алгоритмов обработки информации 1–9 производится последовательно.

Технические принципы построения системы регистрации ВРГП, а также алгоритмов обработки информации, реализованных в системе, прошли отработку и верификацию на многочисленных натурных испытаниях, проведённых в акваториях: Чёрного, Белого, Баренцево и Норвежского моря в период с 2012 по 2022 г.

В качестве примера на рис. 2 представлены графики вертикального (от 0 до 1000 м) распределения температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) и скорости звука (м/с) в зависимости от глубины (м), полученные в результате пуска зонда.

Результаты обработки экспериментально полученных данных с зондов, подтвердили правильность выбранной модели расчёта гидрологических параметров морской воды и работоспособность рассмотренной структуры алгоритмического обеспечения корабельной системы измерения гидрологических параметров морской среды.

**Выводы.** В данной статье представлена отечественная система измерения гидрологических параметров морской среды с помощью одноразовых зондов, разработанная и серийно изготавливаемая АО «Морские неакустические комплексы и системы». Алгоритмы обработки информации, реализованные в данной системе, позволяют в автоматическом режиме производить измерение и построение профилей вертикального распределения гидрологических параметров Система предпусковой калибровки зондов позволяет снизить их стоимость при сохранении высокой точности измерений.

#### *Литература*

1. Степанов В. Н. Океаносфера. М.: Мысль, 1983
2. Калашников П. А. Первичная обработка гидрологической информации. Л.: Гидрометеоздат, 1975. С. 41–48.
3. ГСССД 202-02 Морская вода. Скорость звука при соленостях 0...40 ‰, температурах 0,1...40 $^{\circ}\text{C}$  и избыточных давлениях 0...60 МПа.
4. ГСССД 76-84 Морская вода. Плотность в диапазонах температур  $-2...40^{\circ}\text{C}$ , давлений 0...1000 бар и соленостей 0...42.
5. ГСССД 77-84 Морская вода. Шкала практической солености.

## СУДОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ЛИДАР ПЛД-1 И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ

*В. А. Глухов, Ю. А. Гольдин, канд. физ.-мат. наук, М. А. Родионов, канд. физ.-мат. наук*  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

## SHIPBOARD POLARIZED LIDAR PLD-1 AND SOME RESULTS OF ITS APPLICATION IN COASTAL AREAS OF THE BLACK SEA

*V. A. Glukhov, Yu. A. Goldin, Ph.D., M. A. Rodionov, Ph.D.*  
Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

*Представлены результаты применения лидарного зондирования с борта судна с использованием поляризационного лидара ПЛД-1 в прибрежных районах Черного моря. Общее время проведения лидарной съемки составило около 50 ч. Собран большой массив данных. Обработка данных проведена с использованием аппроксимационного метода. В ряде случаев выявлено изменение положения границы между слоями, отличающимися по гидрооптическим характеристикам. Эта граница приурочена к глубине залегания пикноклина. Наблюдение за изменениями положения границы с течением времени позволило зарегистрировать квазипериодические колебания. Амплитуда и период этих колебаний по своим значениям близки к характеристикам короткопериодных внутренних волн, наиболее часто наблюдаемых в шельфовой зоне Черного моря.*

*The results of the application of lidar sounding from the vessel using the polarizing lidar PLD-1 in the coastal areas of the Black Sea are presented. The overall time of lidar survey was about 50 hours. A large array of data has been collected. Data processing was carried out using the approximation method. In some cases, a change in the position of the boundary between layers differing in hydro-optical characteristics was revealed. This boundary is confined to the depth of the pycnocline. Observation of the changes in the position of the boundary over time made it possible to register quasi-periodic fluctuations. The amplitude and period of these oscillations are close in their values to the characteristics of short-period internal waves, most often observed in the shelf zone of the Black Sea.*

Дистанционное зондирование с борта судна или авианосителя с использованием морских лидаров позволяет определять параметры стратификации первичных гидрооптических характеристик (ПГХ) [1, 2]; обнаруживать и определять параметры светорассеивающих слоев [3, 4], а также регистрировать и определять параметры внутренних волн [5]. При размещении лидара на борту судна при работе через границу раздела лидарную съемку можно выполнять как на ходу судна, так и в дрейфе, что делает такие лидары универсальным инструментом для исследований. Преимуществом проведения лидарного зондирования с борта судна является возможность сопоставления данных зондирования с контактными измерениями с использованием STD-зондов и прозрачномеров. В настоящее время нет универсального алгоритма обработки массивов данных лидарного зондирования — каждая ситуация требует своего подхода к обработке. В случае двухслойной стратификации гидрооптических характеристик при расположении границы между слоями в пределах дальности регистрации эхо-сигнала можно определить положение этой границы [5]. При продолжительных измерениях в точке или на ходу судна регистрируются временные изменения положение границы между слоями. Проведение лидарной съемки в районах распространения короткопериодных внутренних волн позволяет зарегистрировать соответствующие квазипериодические структуры.

Цель работы — применение аппроксимационного метода обработки данных лидарного зондирования в случае двухслойной стратификации гидрооптических характеристик к массиву данных лидарной съемки для поиска и определения параметров квазипериодических структур, обусловленных короткопериодными внутренними волнами, распространяющимися вблизи пикноклина. В ходе натурных исследований в прибрежных районах Черного моря в июне 2016 г. был выполнен ряд измерений лидаром ПЛД-1 [6] и STD-зондом SeaBird SBE-25 с прозрачномером. Основные характеристики лидара ПЛД-1 представлены в табл. 1. Синхронные измерения вертикальных профилей показателя ослабления света, а также температуры и солености, и лидарное зондирование с борта судна через поверхность воды выполнено в разных точках полигона с различными параметрами вертикальной стратификации. Во всех случаях стратификация имела ярко выраженный двухслойный характер с верхним более мутным слоем.

Глубины залегания пикноклина менялись в пределах от 14 до 18 м. Глубина видимости диска Секки в районе работ менялась от 9 до 11 м. Продолжительность каждой серии зондирований составляла 60 мин. Полученные экспериментальные данные позволили провести сравнение лидарных эхо-сигналов с результатами контактных измерений.

Таблица 1

Основные технические характеристики лидара ПЛД-1

| Наименование                                                 | Значение |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| Длина волны зондирующего излучения, нм                       | 532      |
| Длительность зондирующего импульса по уровню 0,5 энергии, нс | 7        |
| Импульсная мощность, мДж                                     | 20       |
| Частота зондирования, Гц                                     | 1        |
| Полоса пропускания приемной системы, МГц                     | 300      |
| Частота дискретизации приемной системы, ГГц                  | 2,5      |

Обработка полученных эхо-сигналов производилась аппроксимационным методом, хорошо показавшим себя при обработке отдельных данных лидарного зондирования [5]. Суть метода заключается в выделении квазиоднородных участков спада эхо-сигнала и подборе для них параметров аналитической функции аппроксимации, вид которой следует из лидарного уравнения [1]. Границы участков аппроксимаций определялись по особенностям формы затухания эхо-сигнала с глубиной. Критерием правильности выбора интервалов глубин и параметров аппроксимации является точность аппроксимации заданных участков, оцениваемая методом наименьших квадратов. Точка пересечения аппроксимационных кривых для верхнего и пограничного участков спада эхо-сигнала является характерной точкой и принимается за положение границы между слоями. Как показано в работе [5], найденное таким образом положение границ слоев соответствует положению пикноклина. Положение границ между слоями под воздействием разных гидрофизических факторов меняется со временем. Обработка массива данных дистанционного лидарного зондирования позволяет регистрировать эти изменения.

В данной работе обрабатывались сигналы кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала. Запись эхо-сигналов производилась в режиме ранжирования, подробно описанного в [5]. Применение режима ранжирования позволило зарегистрировать форму эхо-сигнала в диапазоне глубин 10–23 м. Последовательность обработки каждого эхо-сигнала в серии зондирований заключалась в следующем. Исходя из профиля гидрооптических характеристик, измеренного с помощью зонда SBE 25 с прозрачномером перед началом часовой регистрации эхо-сигналов, выбираются участки сигнала для построения аппроксимаций. Вертикальный профиль гидрооптических и гидрофизических характеристик, а также форма спада лидарных эхо-сигналов позволяет выделить три участка, различающимися по своим характеристикам — верхний более мутный, нижний более прозрачный и тонкий пограничный слой. На рис. 1, 2 представлены кросс-поляризованные эхо-сигналы в полулогарифмическом масштабе, зарегистрированные в режиме ранжирования в разные моменты часовой регистрации в дрейфе судна. Для серии лидарного зондирования, сигналы которой показаны на рис. 1 и 2, были выбраны следующие интервалы для подбора параметров аппроксимирующих функций: от 13 до 15 м, от 15 м до 18 м и от 18 м до 23 м. В ходе обработки в случае изменения формы эхо-сигнала положение этих границ корректируется. Для каждого интервала строится аппроксимирующая функция. Такой подход применялся к каждому из 3600 эхо-сигналов в часовой серии зондирований, что позволило зарегистрировать положение границ пограничного слоя с течением времени. На рис. 1, 2 пунктиром показаны соответствующим образом построенные аппроксимирующие прямые для каждого из участков, пересечение которые позволяют определить положение верхней и нижней границы области резкого изменения показателя ослабления. В результате пересечения аппроксимационных прямых, показанных на рис. 1, можно определить положение верхней и нижней границ пограничного слоя — 15,3 и 20,5 м соответственно. Для сигнала, показанного на рис. 2 — 14,2 и 19,5 м. Из приведенных результатов следует, что в течение 4 мин регистрации верхняя и нижняя границы пограничного слоя синхронно поднялись по глубине на величину порядка 1 м.

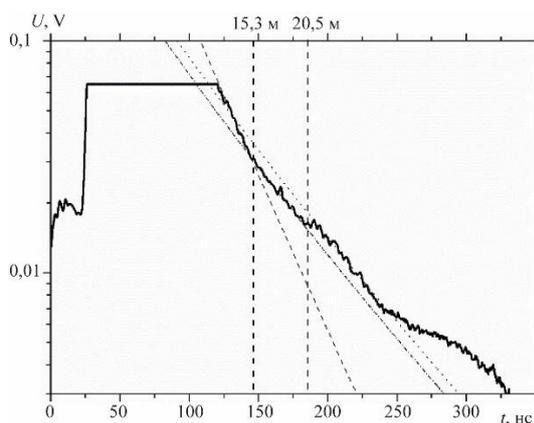


Рис. 1. Эхо-сигнал, зарегистрированный в 22 минуту от начала записи.

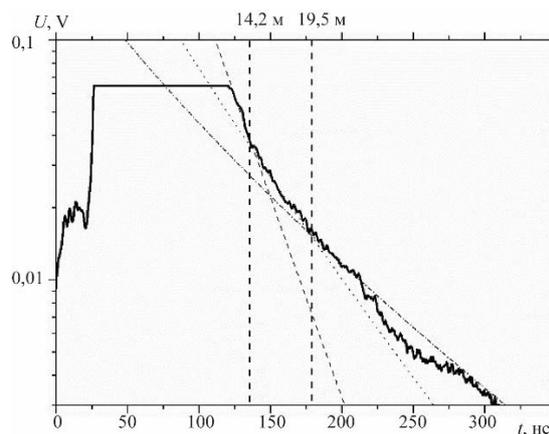


Рис. 2. Эхо-сигнал, зарегистрированный в 26 минуту от начала записи.

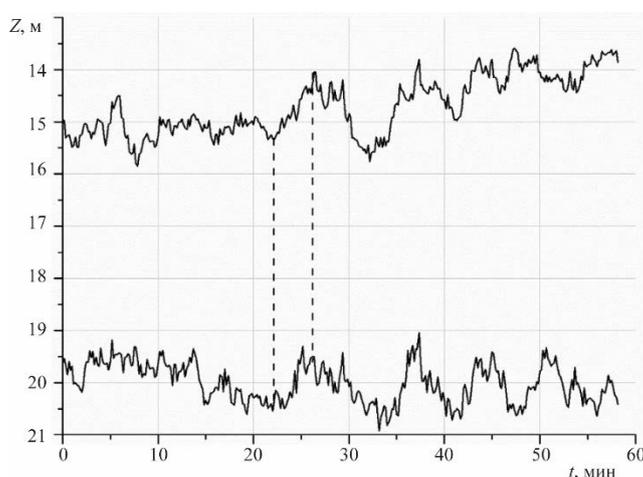


Рис. 3. Положение верхней и нижней границ пограничного слоя, полученные в результате обработки данных лидарной съемки аппроксимационным методом.

Пунктиром отмечены моменты времени, соответствующие сигналам, представленным на рис. 1 и 2.

Результат обработки часовой серии зондирований показан на рис. 3. Верхняя кривая соответствует положению верхней границы пограничного слоя, а нижняя кривая — нижней. Во второй половине серии лидарного зондирования наблюдается синхронное квазипериодическое изменение положения границ пограничного слоя. На нижней границе эти изменения выражены более ярко. Приведенный рисунок позволяет оценить амплитуду и период изменения положения пограничного слоя. Максимальная зарегистрированная амплитуда составляет 1,8 м, а период колебаний — 6–7 мин. Отличительной особенностью этой серии зондирования является синхронность колебаний на обеих границах с практически одинаковой амплитудой и возможность регистрации момента прихода внутренней волны в точку измерений.

Аналогичным образом было обработано около 50-ти часовых серии лидарного зондирования. В 6 сериях зондирований также удалось зарегистрировать квазипериодические изменения положения границ пограничного слоя. Средний период таких структур составил 5–7 мин, амплитуда — 1,5–3 м. Указанные значения характерны для внутренних волн, регистрируемых в шельфовой зоне Черного моря [7, 8]. Метод лидарной съемки открывает большие возможности для дистанционной регистрации динамических процессов в толще морской воды, однако, разные типы стратификации требуют разработки и апробации соответствующих алгоритмов обработки.

*Литература*

1. Vasilkov A. P., Goldin Yu. A., Gureev B. A., Hoge F. E., Swift R. N., Wright C. W. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // *Appl. Opt.* 2001. Vol. 40. P. 4353–4364.
2. Churnside J.H., Donaghay P.L., Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES J. of Marine Science.* 2009. Vol. 66. P. 778–789.
3. Peituo Xu et al., Design and validation of a shipborne multiple-field-of-view lidar for upper ocean remote sensing // *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2020. Vol. 254. 107201. ISSN 0022-4073, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107201>.
4. Churnside J. H., Donaghay P. L., Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES J. of Marine Science.* 2009. Vol. 66. P. 778–789.
5. Глухов В. А., Гольдин Ю. А., Родионов М. А. Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2021. – Т. 14, №. 3. С. 86–97.
6. Глухов В. А., Гольдин Ю. А., Родионов М. А. Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика.* 2017. Т. 10, № 2. С. 41–48.
7. Серебряный А. Н., Химченко Е. Е. Исследования внутренних волн на кавказском и крымском шельфах Черного моря летом 2013 г. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2014. Т. 11, № 3. С. 88–100.
8. Лаврова О. Ю., Серебряный А. Н., Митягина М. И., Бочарова Т. Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2013. Т. 10, № 4. С. 308–322.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FMWE-2021-0014.

## ВОЛНОГРАФ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГИДРОУСЛОВИЙ НА ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ

*Е. В. Волощенко, С. П. Тарасов*, д-р техн. наук  
Южный Федеральный Университет, Таганрог, Россия

## THE WAVEGRAPH FOR MONITORING OF HYDROACOUSTIC CONDITIONS IN OFFSHORE WATER AREA

*E. V. Voloshchenko, S. P. Tarasov*, Dr.Sc.  
Southern Federal University, Taganrog, Russia

*Рассмотрены физические принципы функционирования волнографа, применение которого обеспечивает измерение параметров как поверхностного ветрового волнения, так и скоростей течений в слоистой водной среде. В волнографе предложено использовать донное приемоизлучающее антенное устройство (ПАУ), статически сформированные парциальные лепестки результирующей ХН, которого равномерно квантованы по  $k$  телесным секторам в верхней полусфере, причем, за счет эффектов нелинейной акустики возможна их индивидуальная частотная окраска.*

*The physical principles of the functioning of a wavegraph, the use of which provides measurement of the parameters of both surface wind waves and current velocities in a layered water medium, are considered. In the wavegraph, it is proposed to use a bottom receiving-emitting antenna device, the statically formed partial lobes of the resulting DP of which are uniformly quantized over  $k$  solid sectors in the upper hemisphere, and, due to the effects of nonlinear acoustics, their individual frequency coloring is possible.*

Для измерения высоты волны и периода морского волнения используется ультразвуковой (УЗ) эхо-метод, в котором используется измерение временного запаздывания импульсных эхосигналов от горизонтальных участков как «вершин», так и «впадин» бегущей ветровой волны, облучаемых со стороны дна [1, 2]. Однако устройства [1, 2] имеют ограниченные функциональные возможности и не позволяют измерять: для поверхностного ветрового волнения — направление и скорость бега волн, для водной среды — величины скоростей разнонаправленных течений в ее слоях, например, в приповерхностном, а также перестраивать зондирующий УЗ сигнал под изменяющиеся параметры гидроусловий на прибрежной акватории.

На рис. 1 представлена структурная схема волнографа [3, 4], в состав которой входят тракты: излучения, приема и регистрации, включающий в себя каналы обработки амплитудных и частотных признаков эхо-сигналов. Особенностью устройства является использование донного приемоизлучающего антенного устройства 5 (ПАУ 5), полусферическая поверхность которого состоит из апертур  $k$  одинаковых электроакустических преобразователей (ЭАП 4), образующих упорядоченную систему параллелей и меридианов [5, 6]. Акустические оси ЭАП 4 равномерно распределены в полупространстве ( $8^\circ$  при уровне 0,7 перекрытия основных лепестков характеристики направленности электроакустического преобразователя (ХН ЭАП), выходя из одной точки, являющейся фазовым центром полусферы (диаметр 0,63 м, резонансная частота ЭАП  $f_0=250$  кГц, диаметр ЭАП 0,059 м, 11 рядов ЭАП). Статически сформированные «парциальные» лепестки результирующей ХН ПАУ равномерно квантованы по  $k$  телесным секторам в полусфере, что позволяет оператору 28 «просматривать» все окружающее пространство, определять пеленги и дистанции до целей, находящихся в зоне обзора, в частности, и рассеивателей (пузырьки, взвешенные частицы, планктон, различные неоднородности и т.п.), для которых величины акустических сопротивлений  $(\rho c)_{1\text{ сл.}}$ ,  $(\rho c)_{2\text{ сл.}}$ , ...,  $(\rho c)_{i\text{ сл.}}$  произвольно флуктуируют относительно акустического сопротивления  $(\rho c)_{\text{ср}}$  водной среды 6. Водная среда 6 обладает слоистой структурой (рис. 1), рассеиватели в слоях имеют нейтральную плавучесть, пассивно переносятся водными массами с различными линейными скоростями течений  $v_{i\text{ сл.}}$  относительно дна, величины которых можно оценить с использованием эффекта Доплера [6].

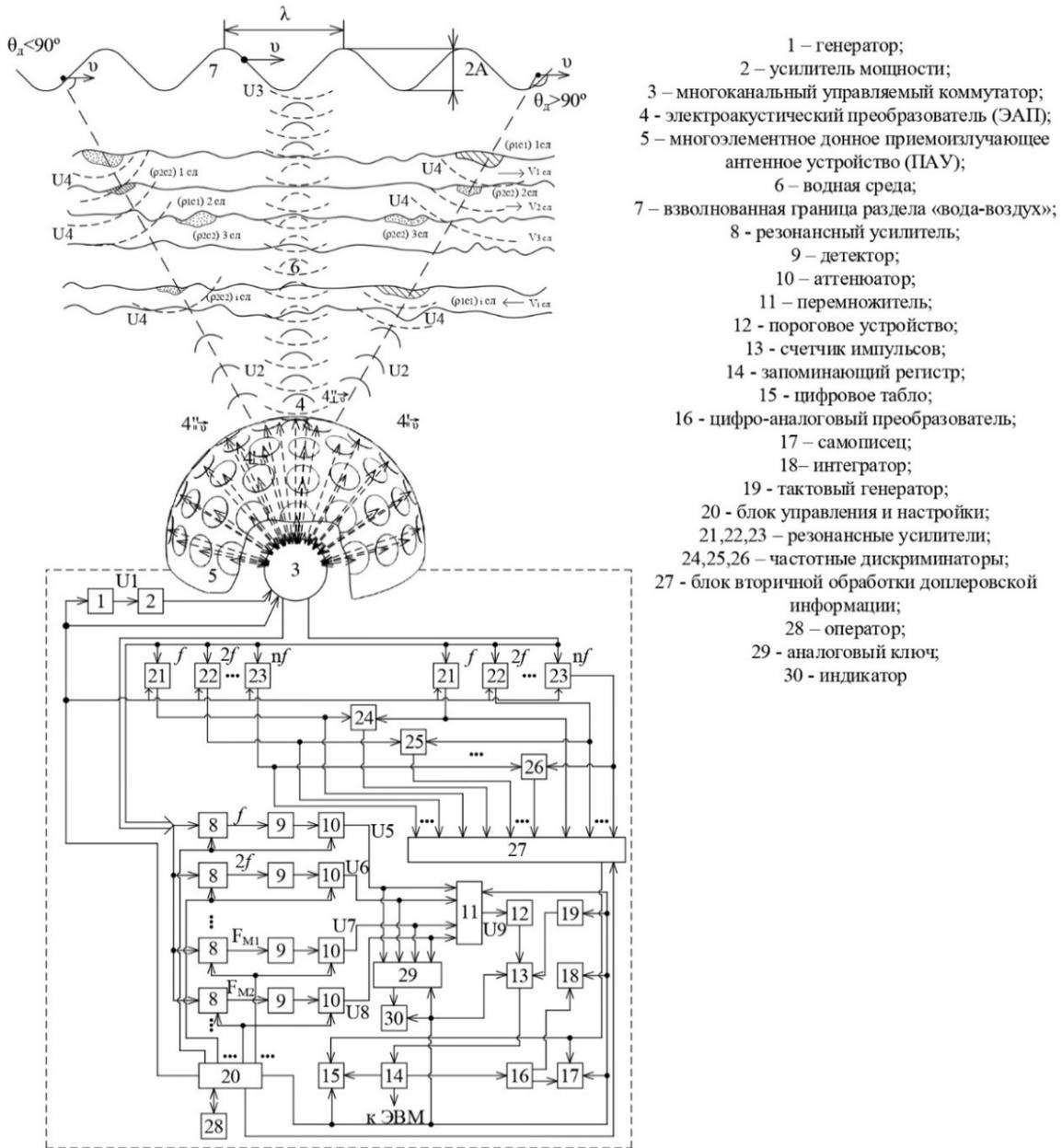


Рис. 1. Структурная схема волнографа [5, 6].

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Кроме указанного выше, водная среда 6 обладает нелинейностью своих упругих свойств, что приводит к возникновению при распространении импульса интенсивной  $U_3$  волны нелинейных эффектов — самовоздействия и самодемодуляции [7]. Получение достоверной информации о параметрах морского волнения с помощью устройства обеспечивается применением для облучения границы раздела «вода-воздух» 7 не только  $U_3$  сигнала с частотой  $f$ , но и сформировавшихся в водной среде 6 акустических сигналов как высоко-, так и низкочастотного диапазонов: — высших гармонических составляющих с частотами  $2f, 3f, \dots, if, \dots, nf$ , где  $n=2, 3, \dots, i, \dots$  — порядковый номер гармоники, и спектральных составляющих с частотами  $F_{M1}=1/2\tau_3, F_{M2}=3/2\tau_3, F_{M3}=5/2\tau_3, F_{Mj}=(2j-1)/2\tau_3, F_{Mm}=(2m-1)/2\tau_3$ , где  $m=1, 2, 3, \dots, j$ , — порядковый номер максимума в спектре,  $\tau_3$  — длительность излученного импульса соответственно. Нелинейные эффекты в акустическом поле, формируемом ЭАП 4, позволяют генерировать НЧ (самодемодуляция) и ВЧ (самовоздействие)  $U_3$  сигналы в пределах небольших телесных углов при практически полном отсутствии бокового поля, причем, для более

высокочастотных спектральных компонент характерно уменьшение угловой ширины основного лепестка ХН. Полигармонический зондирующий сигнал  $U3$ , содержащий спектральные составляющие с частотами  $f, 2f, 3f, \dots, nf$ , где  $n=1, 2, 3, \dots, i$  — порядковый номер гармоники, и  $F_{M1}=1/2\tau_3, F_{M2}=3/2\tau_3, F_{M3}=5/2\tau_3, F_{Mj}=(2j-1)/2\tau_3, F_{Mm}=(2m-1)/2\tau_3$ , где  $m=1, 2, 3, \dots, j$ , — после распространения в водной среде  $\delta$  достигает взволнованной границы раздела «вода–воздух»  $\gamma$  и отражается от нее. На выходе  $(n+m)$  канального приемного тракта обработки амплитудных характеристик дискретных частотных составляющих спектра эхосигнала после усиления, детектирования, изменения амплитуд и перемножения выделенных видеоимпульсных сигналов  $U5(f), U6(2f), \dots, U7(F_{M1}), U8(F_{M2}), \dots$  получаем результирующее напряжение  $U9=U5 \times U6 \times \dots \times U7 \times U8 \dots$ , соответствующее эхосигналу от облучаемой границы раздела «вода–воздух», которое подается на вход порогового устройства 12 [6].

Работоспособность канала обработки частотных признаков эхосигналов основана на том, что информацию получают за счет наклонного эхозондирования и пространственной стратификации как участков бегущей ветровой волны на взволнованной границе раздела «вода–воздух», так и неоднородной водной среды  $\delta$  на  $1, 2, \dots, i, \dots, k$  горизонтов глубин, в которых случайным образом распределены и переносятся течениями со скоростями  $v_{1\text{ сл}}, v_{2\text{ сл}}, v_{3\text{ сл}}, \dots, v_{i\text{ сл}}, \dots, v_{k\text{ сл}}$  совокупности рассеивателей. В соответствии с эффектом Доплера происходит изменение частоты ультразвука при отражении от движущихся как рассеивателей, так и фронтов ветровой волны, причем, при их сближении с ПАУ 5 — доплеровский сдвиг частот имеет знак «+», а при удалении от ПАУ 5 — доплеровский сдвиг частот имеет знак «-» (рис. 1). В приеме осуществляют на сигналах кратных частот стробирование полученной информации, например, для получения по  $i$  горизонту глубин данных о величине скорости  $v_{(i\text{ сл})}$  течения через ее компоненты, т.е. из соотношения  $v_{(i\text{ сл})}^2 = v_{x(i\text{ сл})}^2 + v_{y(i\text{ сл})}^2$ . Для определения генерального направления бега поверхностной ветровой волны [4] измерений используется последовательная коммутация выходов несколько пар «опозитных» ЭАП  $4', 4''$ , расположенных на пересечениях заданной параллели и меридианов полусферической поверхности донного ПАУ 5, со входом канала обработки доплеровской информации. Акустические оси «опозитных» пар ЭАП  $4', 4''$  должны иметь как одинаковые углы наклона  $\Theta_d$  относительно горизонта, так и находиться в одной вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии донного ПАУ 5. Это формирует двухлучевой доплеровский измерительный канал в слоистой водной среде, причем, по команде оператора 28 вертикальная плоскость наклонного эхозондирования может поворачиваться относительно вертикальной оси симметрии донного ПАУ 5. Коммутация осуществляется до тех пор, пока измеряемые значения доплеровских сдвигов частот для УЗ сигналов, отраженных от двух облучаемых участков взволнованной границы раздела «вода–воздух», не достигнут максимального значения, что и является признаком обнаружения генерального направления бега поверхностной ветровой волны [5, 6]. С вектором горизонтальной скорости  $\vec{v}$  свяжем направление оси  $X$ , которое будем называть — «продольным», а для определения направлений скоростей течений  $v_{1\text{ сл}}, v_{2\text{ сл}}, v_{3\text{ сл}}, \dots, v_{i\text{ сл}}, \dots, v_{k\text{ сл}}$  в слоях введем перпендикулярную ей ось  $Y$  — направление, которой назовем — «поперечным». Для измерения модулей и направлений скоростей  $v_{1\text{ сл}}, v_{2\text{ сл}}, v_{3\text{ сл}}, \dots, v_{i\text{ сл}}, \dots, v_{k\text{ сл}}$  течений в слоях относительно осей  $X$  и  $Y$  необходимо сформировать еще один — «поперечный» - двухлучевой доплеровский измерительный канал в слоистой водной среде, причем, для обоих каналов акустические оси «опозитных» пар ЭАП  $4', 4''$  также должны иметь одинаковые углы наклона  $\Theta_d$  относительно горизонта. Таким образом, для реализации режима измерения кинематических характеристик течений необходимо сформировать «продольный» ( $v_{x(i\text{ сл})}$ ) и «поперечный» ( $v_{y(i\text{ сл})}$ ) двухлучевые доплеровские измерительные каналы, в которых соосные многочастотные пучки ультразвуковых сигналов с частотами  $f, 2f, 3f, \dots, nf$  направлены крестообразно во взаимно перпендикулярные области морской среды.

При проектировании режима доплеровского измерения скорости течений необходимо оценить возможное дополнительное информативное уширение доплеровского спектра эхосигналов в тракте, использующем сигналы объемной реверберации на высших гармониках

$$nf = nc/\lambda_{(nf)},$$

где  $c$  — скорость звука в среде,  $\lambda_{(nf)}$  — длина волны акустического сигнала с частотой  $nf$ . Так, в предположении, что рассеиватели пассивно переносятся течением, механизм уширения спектра обусловлен следующими причинами [8]:

1) турбулентными пульсациями показателя преломления, происходящими в рассеивающем водном объеме со среднеквадратичной скоростью

$$u_T = (0,1 \div 0,3) \times |v_T|,$$

где  $v_T$  — скорость течения в данном объеме. Уширение спектра для рабочих локационных сигналов в данном случае можно рассчитать  $\Delta f_{D T(nf)} = u_T / \lambda_{(nf)}$ ;

2) конечностью размера озвучиваемого объема водной среды

$$V_{\text{рев}(nf)} = (\pi z^2 / 4) \times (\theta_{0,7}^2(nf)) \times (c\tau_n / 2),$$

где  $z$  — расстояние до рассеивающего объема,  $\theta_{0,7}(nf)$  — угловая ширина по уровню 0,7 основного лепестка ХН для ЭАП 4 на кратных частотах,  $\tau_n$  — длительность излучаемого импульса. В данном случае уширение спектра

$$\Delta f_{D L(nf)} = |v_T| \times (L_{(nf)} / \lambda_{(nf)} z),$$

где  $L_{(nf)}$  — поперечный размер водного объема, рассеивающего акустический сигнал с частотой  $(nf)$ .

Отсюда следует, что уширение доплеровского спектра эхосигналов кратных частот, имеет значительную величину для более высокочастотных сигналов, обеспечивая большую информативность и чувствительность канала при, соответственно, меньшей величине погрешности измерения [6]. Таким образом, многочастотный волнограф имеет расширенные эксплуатационные возможности, позволяя получать достоверную информацию о гидроусловиях на акватории в значительном диапазоне изменения их величин, за счёт оптимизации характеристик зондирующего ультразвукового поля, обеспечивая повышение точности и приводя к регистрации уточненных данных.

#### *Литература*

1. Греков А. Н., Васильев Д. М., Котов М. Н. Акустический измеритель параметров волн // Системы контроля окружающей среды. Севастополь. 2006. С. 51–56.
2. Fissel D. B., Birch J. R., Borg K., Melling H. Wave measurements using upward-looking sonar for continental shelf application // In Proc. Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 3-6 May 1999. www.aslenv.com.
3. Акустический волнограф: пат. № 168083 Российская Федерация, №2016108213; заявл. 09.03.2016.; опубл. 17.01.2017.
4. Акустический способ и устройство измерения параметров морского волнения: пат. № 2721307 Российская Федерация, №2019124489, заявл. 01.08.2019, опубл. 18.05.2020.
5. Волощенко В. Ю., Волощенко А. П., Волощенко Е. В. Гидроаэродром: гидроакустические средства обеспечения взлетно-посадочных и навигационных действий для беспилотных гидросамолетов // Изв. вузов. «Авиационная техника». 2020. № 1. С. 141–148.
6. Волощенко В. Ю., Волощенко А. П., Волощенко Е. В. Гидроаэродром: многочастотный гидроакустический волнограф для измерения гидроусловий на акватории // Изв. вузов. «Авиационная техника». 2021. № 1. С. 162–166.
7. Мюир Т. Дж. Нелинейная акустика и ее роль в геофизике морских осадков // Акустика морских осадков / Под ред. Ю. Ю. Житковского, пер. с англ. М.: Мир, 1977. С. 227–273.
8. Богородский А. В., Яковлев Г. В. и др. Гидроакустическая техника исследования и освоения океана. Л.: Гидрометеониздат, 1984. С. 60.

# МЕТОДЫ ПРИКЛАДНОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

## ГРАНИЦЫ ЛУЧЕВОЙ АКУСТИКИ

*И. Е. Лободин*, д-р техн. наук, *А. И. Машошин*, д-р техн. наук  
НИЦ РЭВ и ФИР ВМФ, Санкт-Петербург, Россия

## FREQUENCY BOUNDARIES OF RAY ACOUSTICS

*I. E. Lobodin*, Dr.Sc., *A. I. Mashoshin*, Dr.Sc.

Radio-electronic and information resources Naval Investigation centre, St. Petersburg, Russia

*В работе на основе анализа теоретических и экспериментальных результатов приведены практические рекомендации по выбору нижней частоты валидности применения для гидроакустических расчётов лучевой теории распространения сигнала подводного источника в различных гидроакустических условиях.*

*In the article, in order to determine the lower frequency of validity of the application of the ray theory of propagation of a signal from a subsurface source for hydroacoustic calculations, the known theoretical provisions are analyzed and experimental results are presented, clarifying these provisions for shallow water conditions.*

**Введение.** Как известно, гидроакустическое поле адекватно описывается волновыми уравнениями [1] и, как следствие, расчёты распространения гидроакустических сигналов должны строиться на базе решения этих уравнений. Однако на практике часто используются более простые лучевые методы расчётов, базирующиеся на лучевой теории [2]. Также известно, что лучевая теория является приближением волновой теории и адекватно описывает гидроакустическое поле источника при выполнении ряда условий [3].

Одним из этих условий является граничная частота, выше которой лучевые методы расчёта можно считать адекватными. Поскольку в известных теоретических источниках конкретное значение этой частоты не указано, то возникают трудности при её выборе для решения практических задач. Целью работы является теоретическое обоснование граничной частоты для конкретных гидроакустических условий, а также экспериментальное подтверждение теоретического обоснования.

**Теоретические ограничения лучевой акустики.** Согласно теории гидроакустики [1, 3–5] лучевые методы достаточно точно определяют поле источника при следующих условиях.

1. Скорость звука на длине волны акустического сигнала должна быть неизменной. Количественно это требование выражается в виде неравенства, которое должно выполняться во всех точках подводного волновода

$$\frac{\lambda}{c} \cdot \left| \frac{dc}{dh} \right| \ll 1, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны акустического сигнала;  $c$  — скорость звука в воде;  $\frac{dc}{dh}$  — градиент скорости звука по глубине  $h$ . В океане наибольшие величины градиента скорости звука наблюдаются в слое скачка в низких широтах. Там относительный градиент (т.е. градиент, отнесённый к скорости звука) может достигать величины  $0,004 \text{ м}^{-1}$ . Подставляя это значение в неравенство (1), получим

$$\lambda \ll 250 \text{ м}. \quad (2)$$

Принимая, что условие (2) означает

$$\lambda < 25 \text{ м}, \quad (3)$$

получаем, что в любом районе Мирового океана условие (1) выполняется на частотах, превышающих 60 Гц.

2. Глубина моря  $H$  в районе должна быть достаточно большой по сравнению с длиной волны сигнала источника, т.е.

$$H \gg \lambda. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что, если принять, что минимальная глубина Мирового океана составляет 300 м, то в любом районе Мирового океана условие (4) выполняется на частотах, превышающих 50 Гц.

3. Угол скольжения луча по всей дистанции своего распространения должен быть отличен от нуля, поскольку в противном случае поперечное сечение лучевой трубки стремится к нулю [1]. Данное условие не выполняется в точках полного внутреннего отражения луча, в окрестностях каустик и в фокальных точках. Ввиду этого в этих областях расчёт акустического поля производится по приближенным расчетным формулам [2] или вводятся эмпирические ограничения на величину фактора фокусировки, как правило, составляющие 100 в глубоких морях (более 500 м) и 10 в мелких морях.

Таким образом, из теоретических соображений следует следующий вывод: нижняя граница валидности лучевой акустики по частоте зависит от гидроакустических условий района Мирового океана, для которого выполняются расчёты. Для мелких морей эта частота зависит от глубины района и не превышает 50 Гц, а для глубоких морей — от максимального градиента скорости звука по глубине и не превышает 60 Гц.

**Экспериментальное уточнение границы по частоте применимости лучевой акустики.**

Для экспериментального уточнения сделанных теоретических выводов были использованы записи шума подводного аппарата (ПА), движущегося на глубине 150 м в районе с глубиной 300 м и постоянным слабоположительным градиентом скорости звука от поверхности моря до дна. Приём осуществлялся на ненаправленный измерительный гидрофон с рабочей полосой частот 1–250 Гц, опущенный с борта дрейфующего судна. ПА двигался с постоянными курсом и скоростью, сначала приближаясь к гидрофону, затем удаляясь от него. Шум с выхода гидрофона после усиления подвергался динамическому спектральному анализу. Результаты анализа отображались на дисплее в виде трёхмерного графика «частота (горизонтальная ось) — время (вертикальная ось) — уровень (яркость)». Результаты обработки для трёх галсов движения ПА приведены на рис. 1–3. По оси абсцисс на рис. 1–3 отложена частота от 0 до 250 Гц, по оси ординат — время от 0 до 3-х мин.

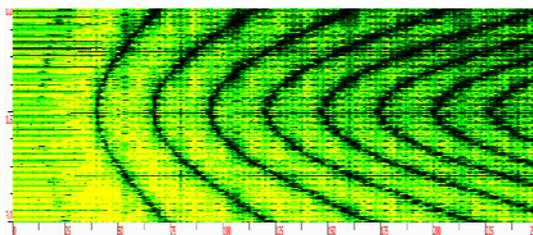


Рис. 1. Динамический спектр шумоизлучения подводного объекта на первом галсе.

Глубина объекта 150 м; глубина приёмника 93 м; траверзное расстояние 510 м.

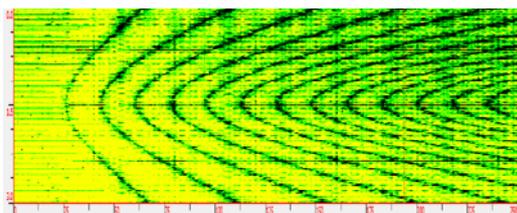


Рис. 2. Динамический спектр шумоизлучения подводного объекта на втором галсе.

Глубина объекта 150 м; глубина приёмника 100 м; траверзное расстояние 304 м.

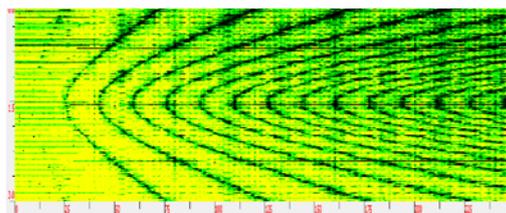


Рис. 3. Динамический спектр шумоизлучения подводного объекта на третьем галсе.

Глубина объекта 150 м; глубина приёмника 93 м; траверзное расстояние 265 м.

Из рассмотрения рисунков следует, что поле шумоизлучения ПА на входе гидрофона определялось двумя лучами – прямым и отражённым от поверхности. Этот факт проявляется в виде интерференционных полос в динамическом спектре. При этом интерференционная структура шума ПА, подающаяся лучевому описанию, сохраняется вплоть до частот 25–30 Гц.

Таким образом, эксперимент показывает, что лучевая структура акустического поля широкополосного источника сигнала сохраняется до частоты, для которой отношение глубины моря и длины волны сигнала равно  $\frac{H}{c} \cdot 30=6$ . Т.е. с учётом полученного результата условие (4) можно конкретизировать как

$$H > 6 \cdot \lambda. \quad (5)$$

**Заключение.** В статье в интересах определения нижней частоты  $f_b$  валидности применения для гидроакустических расчётов лучевой теории распространения сигнала подводного источника проанализированы известные теоретические положения и приведены результаты эксперимента, уточняющие эти положения для условий мелкого моря.

Поскольку искомая частота  $f_b$  зависит от гидроакустических условий в районе, можно сформулировать следующие практические рекомендации по её определению в конкретном случае:

– в морях с глубинами более 500 м частоту  $f_b$  следует определять исходя из максимального градиента скорости звука  $\left| \frac{dc}{dh} \right|_{max}$  по формуле

$$f_b = 10 \cdot \left| \frac{dc}{dh} \right|_{max} \quad (6)$$

либо, учитывая максимально возможный градиент скорости звука, принимать  $f_b$  равной 60 Гц;

– в мелких морях частоту  $f_b$  следует определять исходя из глубины моря  $H$  по формуле

$$f_b = 6 \cdot \frac{c}{H} \quad (7)$$

либо принимать  $f_b$  равной 50 Гц.

#### **Литература**

1. Акустика океана / Под ред. Л. М. Бреховских. М.: Наука, 1974.
2. Матвиенко В. Н., Тарасюк Ю. Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л.: Судостроение, 1976.
3. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
4. Сташкевич А. П. Акустика моря. Л.: Судостроение, 1966. 354 с.
5. Андреева И. Б. Физические основы распространения звука в океане. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 188 с.

## К ВОПРОСУ О КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДАХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНЫХ МНОГОМОДОВЫХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНЫХ ЗВУКОВЫХ КАНАЛАХ

А. И. Малеханов<sup>1,2</sup>, канд. физ.-мат. наук, А. В. Смирнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>ННГУ им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

## ON THE SUBOPTIMAL TECHNIQUES OF COHERENCE-REDUCED SIGNAL PROCESSING IN UNDERWATER SOUND CHANNELS

A. I. Malekhanov<sup>1,2</sup>, Ph.D., A. V. Smirnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia

*Анализируются методы пространственной обработки сигнала на фоне интенсивной помехи с помощью горизонтальной антенной решетки, расположенной в канале мелкого моря. Предполагается, что источники сигнального и помехового полей находятся под различными углами по отношению к антенне, а ее волновой размер превосходит масштабы когерентности. Основное внимание уделено сравнительной оценке эффективности методов обработки, включая оптимальные и близкие к ним, по величине антенного выигрыша. Определены сценарии приема сигналов, для которых относительно простые эвристические методы обеспечивают квазиоптимальную обработку сигналов, что представляется важным с точки зрения приложений.*

*The techniques of horizontal array signal processing against the intense interference background in a shallow sea channel are analyzed. It is assumed that the sources of the signal and interference fields are at different angles with respect to the array, and the array size is large enough in comparison with their coherence scales. The main attention is paid to the comparative evaluation of the effectiveness of the techniques, including optimal and close to them, in terms of the array SNR gain. Signal reception scenarios for which relatively simple heuristic methods provide suboptimal array processing are defined, which is important for applications.*

**Введение.** Известно, что при распространении акустических сигналов в подводном звуковом канале (ПЗК) характерным эффектом является ослабление их пространственной когерентности, обусловленное многократным рассеянием звука на случайных неоднородностях водной толщи и(или) случайной границе. При использовании протяженной антенной решетки (АР) масштаб когерентности сигналов может быть сопоставим и даже меньше ее размера, что отвечает сценарию приема частично-когерентных сигналов. Методы обработки, использующие информацию относительно когерентных свойств (матриц когерентности) сигналов на входе АР, способны обеспечить рост коэффициента усиления АР с увеличением ее размеров даже в такой ситуации, хотя и замедленный в сравнении с тем сценарием, когда принимаемые сигналы являются полностью когерентными [1–4]. При этом практически важным становится вопрос количественной оценки возможностей тех методов обработки, которые не требуют такой информации в полном объеме и являются более простыми в реализации, но обеспечивают достаточно высокую эффективность, т.е. могут оцениваться в качестве квазиоптимальных методов. Этот вопрос рассматривался ранее в ряде работ [1, 2, 4], в том числе, применительно к реалистичным условиям распространения звука в ПЗК [5, 6]. С учетом значительной вариативности таких условий, зависящих также от положения АР, подобная постановка далеко не исчерпана и представляет определенный интерес для дальнейшего исследования.

**Постановка задачи.** Предполагаем, что удаленные источники полезного сигнала и помехи находятся под некоторыми углами  $\theta_s$  и  $\theta_N$ , соответственно, к линейной эквидистантной АР, расположенной в горизонтальной плоскости ПЗК на некоторой глубине (углы отсчитываются от нормали к АР). Сигналы принимаются на фоне пространственно-белого шума (например, шума в каналах АР), анизотропные свойства морских шумов не учитываются. Определенные поправки на этот счет могут быть сделаны [7], но здесь мы исходим из того, что входное отношение сигнал/шум (ОСШ) определяется преимущественно мощным источником помехи. В рамках модового описания звуковых полей в ПЗК мы используем достаточно общее представление векторов полезного сигнала  $\mathbf{S}$  и помехи  $\mathbf{N}$  на входе АР в виде суммы конечного числа  $M$

плоских волн, волновые числа которых  $h_m$  есть продольные волновые числа мод дискретного спектра в заданном ПЗК ( $M$  — число таких мод), со случайными амплитудами, зависящими как от регулярных параметров задачи (глубин положения источников и АР), так и от эффектов распространения сигналов (фазовых набегов и затухания мод по дистанции):

$$S_n = \sum_{m=1}^M a_{Sm} e^{ih_m d(n-1)\sin\theta_S}, N_n = \sum_{m=1}^M a_{Nm} e^{ih_m d(n-1)\sin\theta_N}, n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где  $N$  — число элементов АР. Подробный анализ функции когерентности многомодовых сигналов в рамках модели (1) представлен в работе [8], результаты которой указывают на существенную зависимость от совокупности физических факторов распространения звука в ПЗК — спектра волновых чисел, интенсивностей мод, взаимных корреляций модовых амплитуд.

В качестве критерия эффективности обработки сигналов мы рассматриваем величину коэффициента усиления  $G$  (антенного выигрыша) по величине отношения выходного ОСШ к входному ОСШ. Опираясь на известные положения теории пространственной обработки сигналов и следуя работам [1–4], мы используем для расчетов общие выражения для антенного выигрыша  $G$  в случае линейной и квадратичной обработки. Для линейной обработки, которая определяется весовым вектором АР, это выражение имеет вид:

$$G_{LIN} = \frac{\sigma_{Noise}^2}{\sigma_S^2} \times \frac{\mathbf{w}^+ \mathbf{R}_S \mathbf{w}}{\mathbf{w}^+ \mathbf{R}_{Noise} \mathbf{w}}, \quad \sigma_{Noise}^2 = \sigma_{wn}^2 + \sigma_N^2. \quad (2)$$

Здесь  $\mathbf{R}_S = \langle \mathbf{S}\mathbf{S}^+ \rangle$ ,  $\mathbf{R}_{Noise} = \mathbf{I} + \langle \mathbf{N}\mathbf{N}^+ \rangle$  — матрицы когерентности сигнала и совокупности шума и помехи, соответственно ( $\mathbf{I}$  — единичная матрица);  $\mathbf{w}$  — весовой вектор АР;  $\sigma_S^2$ ,  $\sigma_N^2$  и  $\sigma_{wn}^2$  — входные интенсивности сигнала, помехи (усредненные по элементам АР) и белого шума, соответственно; верхний индекс "+" и угловые скобки  $\langle \dots \rangle$  означают эрмитово сопряжение и статистическое усреднение. Для квадратичной обработки аналогичное выражение имеет вид:

$$G_{QUA} = \frac{\sigma_{Noise}^2}{\sigma_S^2} \times \frac{Sp(\mathbf{W}\mathbf{W}^+ \mathbf{R}_S)}{\sqrt{Sp(\mathbf{W}\mathbf{W}^+ \mathbf{R}_{Noise})^2}}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{W}$  — весовая матрица, состоящая из нескольких (более одного) весовых векторов АР;  $Sp(\dots)$  — след матрицы. Конкретизируя метод обработки путем выбора весового вектора или весовой матрицы, мы получаем величину критерия его эффективности при заданных (модельных или эмпирических) матрицах когерентности полей на входе АР, что позволяет оценить зависимость от параметров задачи и количественно сравнить методы между собой.

В данной работе мы анализируем следующие методы пространственной обработки:

1. метод фазированной АР (ФАР) — стандартный метод, не использующей какой-либо априорной информации относительно когерентных свойств принимаемых сигналов;

2. метод оптимальной линейной обработки, обеспечивающий максимум величины (2);

3. метод оптимальной квадратичной обработки, обеспечивающий максимум величины (3);

4. метод некогерентного накопления выходных сигналов подрешеток (метод подрешеток) — эвристический метод квадратичной обработки, при котором АР делится на некоторое количество одинаковых подрешеток, каждая из которых есть «сокращенная» ФАР с размером, примерно равным длине когерентности полезного сигнала [2, 4];

5. метод некогерентного накопления сигналов ФАР, каждая из которых фазирована в определенный угол со сдвигом относительно других (метод парциальных диаграмм) — также эвристический метод квадратичной обработки, при котором формируется многолучевая (по числу парциальных диаграмм) диаграмма обзора углового пространства в горизонтальной плоскости ПЗК (аналог некогерентной фильтрации мод в вертикальной плоскости канала [5]). Соответствующие значения выигрыша АР обозначены ниже, как  $G_1, \dots, G_5$ .

**Результаты моделирования.** Численный анализ выполнен для модельных условий приема сигналов в канале мелкого моря с постоянной по глубине скоростью звука 1500 м/с, глубиной 100 м, дном в виде жидкого полупространства (плотность 2 г/см<sup>3</sup>, скорость звука 1800 м/с, декремент затухания 0,2 дБ/(км×Гц)). Изоскоростные или близкие к ним каналы являются характерными для мелководных акваторий северных морей в зимний период. Задана также частота (300 Гц), для которой число мод в таком канале составляет  $M = 22$ . Расчеты матриц когерентности сигналов вида (1) выполнены в предположении отсутствия межмодовых корреляций (что эквивалентно усреднению по интерференционной структуре вдоль трассы распространения) [8]. Интенсивности мод  $\langle |a_m|^2 \rangle$  эвристически задаются в виде гауссовой кривой с максимумом на определенной моде, номер которой  $m_0$  есть параметр задачи, ширина спектра по характерному спадаанию кривой задана величиной  $\sigma_s = 5$ . Аналогичным образом моделируется сигнал и матрица когерентности источника помехи. Следовательно, сигнал и помеха локализованы в довольно узкой (в сравнении с полным число мод) группе мод, что качественно отвечает условиям эволюции модового спектра звукового поля по дистанции.

Рис. 1 иллюстрирует «иерархию» методов обработки в случае приема сигнала в отсутствие помехи при следующих значениях параметров: входное ОСШ  $\sigma_s^2/\sigma_{wn}^2 = 6$  дБ, направление на источник  $\theta_s = 30^\circ$ , размер подрешеток  $N_{SUB} = 40$ . Рис. 1, а и рис. 1, б отличаются номером наиболее интенсивной моды сигнала: а —  $m_0 = 1$  (сигнал локализован в группе низких мод), б —  $m_0 = 16$  (в группе средних мод). От этого сильно зависит масштаб  $N_{Scor}$  когерентности сигнала и величина смещения максимума углового отклика АР на такой сигнал [8]: в данном случае  $N_{Scor} \sim 200$  и 25, соответственно. Зависимости выигрыша для ФАР и метода подрешеток построены от угла фазировки, выигрыш АР для метода парциальных диаграмм показан точками, каждая из которых отвечает углу фазировки парциальной диаграммы (числа над точками есть число таких диаграмм). Значения выигрыша АР для обоих оптимальных методов приведены на графиках.

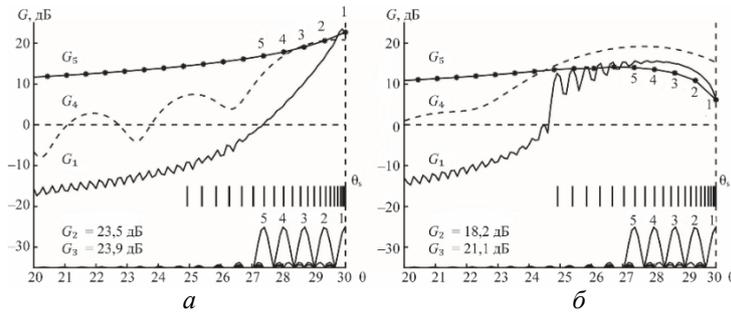


Рис. 1. Выигрыш АР как функция угла фазировки для метода ФАР ( $G_1$ ) и метода подрешеток ( $G_4$ ), точки — выигрыш для метода парциальных диаграмм ( $G_5$ ) в зависимости от их числа (первые пять диаграмм показаны в нижней части рисунка).

Сигнал принимается на фоне белого шума и локализован в области низких мод (а —  $m_{s0} = 1$ ) или средних мод (б —  $m_{s0} = 16$ ); остальные параметры приведены в тексте; вертикальными линиями показаны эквивалентные углы прихода сигнальных мод.

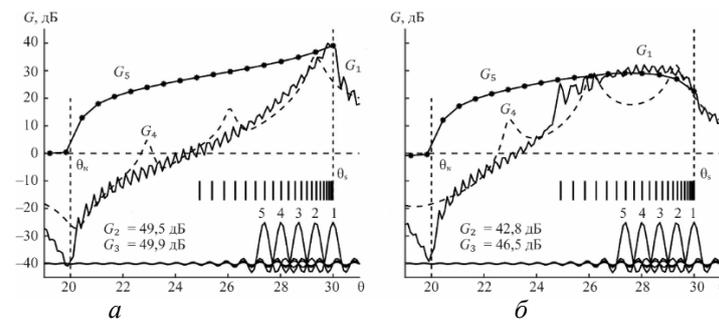


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, в случае приема сигнала на фоне интенсивной помехи ( $\theta_N = 20^\circ$ ,  $m_{N0} = 1$ ).

На рис. 1, б видно, что при «правильной» фазировке на источник метод ФАР и метод подрешеток обеспечивают близкие к оптимальным значения и могут рассматриваться в качестве квазиоптимальных. Метод парциальных диаграмм имеет максимум выигрыша в однолучевом варианте, когда он совпадает с методом ФАР, а формирование дополнительных «лучей» только уменьшает его эффективность. Однако, с «перестройкой» модового состава сигнала и его смещением в область средних мод (правый рисунок) ситуация меняется. Смещение «эффективного» углового спектра сигнала в область меньших углов приводит к проигрышу всех методов, основанных на фазировке в направлении на источник. Квазиоптимальным здесь становится метод подрешеток с коррекцией угла фазировки. Видно также, что накопление числа парциальных диаграмм (до 4...8) повышает эффективность этого метода. Характерным эффектом при уменьшении масштаба когерентности является также не только уменьшение, но и существенная разница (до 3 дБ) величины выигрыша для двух оптимальных методов.

На рис. 2 приведены аналогичные зависимости в случае появления интенсивной помехи ( $\sigma_S^2/\sigma_N^2 = -20$  дБ), сигнал которой сосредоточен в области низких мод, с направления  $\theta_N = 20^\circ$ . Видно, что эффективность методов обработки качественно изменилась как в абсолютных значениях, так и во взаимном соотношении. Все три эвристических метода значительно уступают оптимальным (на  $\sim 10$  дБ и более), хотя значения выигрыша АР ожидаемо возросли вследствие угловой фильтрации (частичного подавления) помеховых мод. Эффективность подавления интенсивной помехи определяет иерархию методов обработки в большей степени, чем ослабление когерентности полезного сигнала, поэтому угловое разрешение играет здесь важную роль (ясно, что оно значительно слабее для коротких подрешеток). Отметим также относительно высокую эффективность метода парциальных диаграмм, особенно в ситуации правого рисунка: формирование веера «лучей», совместно закрывающих область углов  $\sim 10^\circ$ , обеспечивает устойчиво высокие значения выигрыша в сравнении с другими методами.

**Заключение.** Корректный выбор метода квазиоптимальной обработки многомодовых сигналов в условиях ПЗК может быть основан на достаточно простых соображениях эвристического характера, однако, он зависит от целого ряда факторов. К наиболее важным следует отнести оценку модового состава принимаемых сигналов, которая зависит от ожидаемого диапазона глубин источников, и масштабов их когерентности, которые, в свою очередь, весьма «чувствительны» к спектру продольных волновых чисел и могут быть оценены на основе априорной информации относительно сезонной гидрологии ПЗК.

### *Литература*

1. Cox H. Line array performance when the signal coherence is spatially dependent // J. Acoust. Soc. Amer. 1973. Vol. 54, № 6. P. 1743–1746.
2. Morgan D. R., Smith T. M. Coherence effects on the detection performance of quadratic array processors, with applications to large-array matched-field beamforming // J. Acoust. Soc. Am. 1990. Vol. 87, № 2. P. 737–747.
3. Городецкая Е. Ю., Малеханов А. И., Таланов В. И. Моделирование оптимальной пространственной обработки сигналов в подводных звуковых каналах // Акуст. журн. 1992. Т. 38, № 6. С. 1044–1051.
4. Smirnov A. V., Malekhanov A. I. Comparative study of large-array processors of the coherence-reduced acoustic signals in random underwater channels // РОМА. 2021. Vol. 44. P. 055004 1–11.
5. Малеханов А. И. Некогерентная пространственная фильтрация мод в случайно-неоднородном океаническом волноводе // Акуст. журн. 1992. Т. 38, № 5. С. 898–904.
6. Cox H., Zeskind R. M., Myers M. A subarray approach to matched-field processing // J. Acoust. Soc. Amer. 1990. Vol. 87, № 1. P. 168–178.
7. Бурдуковская В. Г., Малеханов А. И., Раевский М. А. Влияние анизотропного ветрового волнения на эффективность пространственной обработки акустических сигналов в мелком море // Акуст. журн. 2021. Т. 67, № 6. С. 617–625.
8. Малеханов А. И., Смирнов А. В. Моделирование пространственной когерентности многомодового сигнала и отклика горизонтальной антенны в случайно-неоднородном океаническом волноводе // Изв. вузов. «Радиофизика». 2022. Т. 65 (в печати).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-19-00383).

СУБОПТИМАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК  
В ПРОСТРАНСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫБОРКИ

*V. S. Melkanovich*, канд. техн. наук

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

SUBOPTIMAL IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING  
ALGORITHMS FOR MULTI-ELEMENT ANTENNA ARRAYS IN THE SPACE  
OF SAMPLING ELEMENTS

*V. S. Melkanovich*, Ph.D.

JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

*Рассмотрена задача реализации адаптивных алгоритмов, основанных на минимизации выходной мощности с линейными и квадратичными ограничениями в условиях, когда число гидрофонов многократно больше размерности выборки. Решение основано на использовании априорной модели распределенной помехи совместно с формированием по выборке подпространства сильных сигналов.*

*The problem of implementing adaptive algorithms based on minimizing the output power with linear and quadratic constraints for hydroacoustic antenna arrays under conditions where the number of hydrophones is many times greater than the dimension of the input samples is considered. The solution is based on the use of a priori model concepts of distributed noise together with the formation of strong signals subspace based on a minimum dimension sample.*

**Введение.** Настоящая работа посвящена рассмотрению задачи повышения эффективности адаптивной обработки сигналов акустических антенных решеток (АР) в условиях, когда число элементов АР превосходит число элементов выборки, под которым понимается число реализаций комплексных спектров, используемых на отдельно взятом интервале обучения.

На современном этапе адаптивную обработку сигналов принято строить на основе алгоритма минимизации выходной мощности с линейными ограничениями [1]. Этот алгоритм является асимптотически оптимальным. Действительно, выражение для функции правдоподобия в случае, когда полезный сигнал представлен волновым фронтом, а выборка представлена векторами комплексных отсчетов  $\vec{X}_k(w_n)$  по выходу элементов антенной решетки (АР) на интервале  $n \in [N_{\min}, N_{\max}]$  номеров частотных отсчетов,  $k = 1, \dots, K$  интервалов спектрального анализа (СА), логарифм функции правдоподобия имеет вид (здесь и ниже  $w_n$  опущены):

$$\ln P(X) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=N_{\min}}^{N_{\max}} (-\ln \det \Theta - \vec{X}_k^+ \Theta^{-1} \vec{X}_k) + const, \quad (1)$$

где  $\Theta = \vec{V}_s \vec{V}_s^+ s + \Theta_N$  — спектрально-корреляционная матрица (СКМ) сигналов гидрофонов АР на частоте  $w_n$ ;  $V_s$  — вектор амплитудно-фазового распределения фронта сигнала; «+» — знак эрмитова сопряжения;  $s$  — энергетический спектр сигнала;  $\Theta_N$  — СКМ помех, а вектор оптимальных весовых коэффициентов имеет вид:

$$\vec{A}_{opt} = \frac{\Theta_N^{-1} \vec{V}_s}{\vec{V}_s^+ \Theta_N^{-1} \vec{V}_s}. \quad (2)$$

В то же время в предположении, что выборочная оценка СКМ  $\hat{\Theta}$  имеет вид

$$\hat{\Theta} = XX^+ = \vec{V}_s \vec{V}_s^+ s + \hat{\Theta}_N, \quad (3)$$

где  $X$  — матрица входной выборки размерности  $L$  на  $K$ , составленная из вектор-столбцов, содержащих значения комплексных спектров по выходу элементарных каналов АР на  $K$  последовательных интервалах спектрального анализа;  $\hat{\Theta}_N$  — выборочная оценка СКМ помех, весовой вектор алгоритма Кейпона сводится к виду

$$\vec{A}_{Cap} = \frac{\hat{\Theta}^{-1}\vec{V}}{\vec{V}^+\hat{\Theta}^{-1}\vec{V}} = \frac{\hat{\Theta}_N^{-1}\vec{V}}{\vec{V}^+\hat{\Theta}_N^{-1}\vec{V}}, \quad (4)$$

где  $\vec{V}$  — весовой вектор формирования неадаптивного канала.

Выражение (4) в стационарных условиях асимптотически сходится к выражению (2), однако на практике, в условиях нестационарности, времени, достаточного для сходимости, может не быть и число реализаций обучающей выборки  $K$  должно быть в разы или даже в десятки раз меньшим, чем число элементов  $L$ .

Одним из путей преодоления этой проблемы, а также проблем, связанных с плохой обусловленностью оценок корреляционных матриц и неточным знанием вектора  $V$ , является использование регуляризации (diagonal loading) [2, 3]. В [4–6] представлены алгоритмические решения, обеспечивающие простую реализацию алгоритмов минимизации выходной мощности с линейными и квадратичными ограничениями с использованием регуляризации. Обработка сигналов реализуется в пространстве элементов выборки (пространстве реализаций).

Недостаток применения регуляризации состоит в том, что регуляризованная оценка корреляционной матрицы  $\hat{\Theta} = XX^+ + \mu I$ , где  $\mu$  — параметр регуляризации, принципиально не может совпадать с фактической матрицей  $\hat{\Theta}$ . В случае, если  $\mu$  оказывается кардинально меньшим, чем составляющая распределенной помехи, в собственных числах, оценки СКМ образуется оторванная группа собственных чисел матрицы  $X^+X$ . Если же используется значение  $\mu$  порядка уровня распределенной помехи, происходит занижение уровня помехи на этапе когерентной обработки сигнала, которой соответствует числитель (2). В конечном счете указанные явления приводят к росту уровня остаточных боковых лепестков сильных локальных помех, препятствующих обнаружению слабых полезных сигналов.

**Целью настоящей работы** является поиск путей снижения уровня остаточных боковых лепестков локальных помех при реализации алгоритмов с линейными и квадратичными ограничениями для многоэлементных АР при минимальном размере обучающей выборки.

Предлагаемое решение основывается на использовании априорного представления о распределенной помехе как об изотропной некоррелированной. Модельная СКМ помех для выражения (2) формируется как сумма компоненты сильных когерентных сигналов, присутствующих в выборке, и компоненты распределенной помехи, СКМ которой полагается диагональной. Векторное подпространство сильных когерентных сигналов, в число которых входят и сигналы помех, формируется уже при минимальных значениях размера выборки  $K$ , а вследствие превалирования в выборке именно энергии помех.

В наиболее простом варианте выражение для модельной СКМ помех имеет вид:

$$\hat{\Theta}_N = U_{oL}(\Lambda_o - dI_{Mo})U_{oL}^+ + dI_L, \quad (5)$$

где  $U_{oL}$  и  $\Lambda_o$  — матрицы  $Mo$  старших собственных векторов и собственных чисел  $XX^+$  — СКМ сигналов на элементах АР;  $Mo$  — число локальных помех;  $d$  — значение составляющей энергии распределенной помехи в собственных числах матрицы  $\hat{\Theta}_N$ ;  $I_{Mo}$  и  $I_L$  — единичные матрицы размерности  $Mo$  и  $L$ . Учитывая, что

$$\hat{\Theta}_N^{-1} = \frac{1}{d}I_L - U_{oL}(\Lambda_o^{-1} - \frac{1}{d}I_{Mo})U_{oL}^+ \text{ и } U_{oL} = XU_{oR}\Lambda_o^{-1/2}, \quad (6)$$

где  $U_{oR}$  — матрица размерности  $K$  на  $Mo$  старших собственных векторов СКМ элементов выборки (реализаций)  $X^+X$ . Значение выходной мощности алгоритма с линейными ограничениями, вычисленное по выборке  $X$ , после подстановки (5) и (6) в (4) принимает вид:

$$P_{Cap} = \vec{A}_{Cap}^+ X X^+ \vec{A}_{Cap} = \frac{\vec{y}\vec{y}^+ - \vec{y}U_{oR}U_{oR}^+\vec{y}^+ + d^2\vec{y}U_{oR}\Lambda_o^{-2}U_{oR}^+\vec{y}^+}{L - d\vec{y}U_{oR}\Lambda_o^{-1}U_{oR}^+Y^+ + d\vec{y}U_{oR}\Lambda_o^{-2}U_{oR}^+\vec{y}^+}, \quad (7)$$

где  $\vec{y} = \vec{V}^+X$  — вектор-строка комплексных спектров по выходу неадаптивного обзора.

Значение выходной мощности алгоритма с квадратичными ограничениями (Борджотти-Лагунаса) отличается только коэффициентом нормирования в знаменателе:

$$P_{BL} = \frac{\vec{V}^+\hat{\Theta}_N^{-1}XX^+\hat{\Theta}_N^{-1}\vec{V}}{\vec{V}^+\hat{\Theta}_N^{-2}\vec{V}} = \frac{\vec{y}\vec{y}^+ - \vec{y}U_{oR}U_{oR}^+\vec{y}^+ + d^2\vec{y}U_{oR}\Lambda_o^{-2}U_{oR}^+\vec{y}^+}{L - d\vec{y}U_{oR}\Lambda_o^{-1}U_{oR}^+Y^+ + d^2\vec{y}U_{oR}\Lambda_o^{-3}U_{oR}^+\vec{y}^+}. \quad (8)$$

На рис. 1–3 представлены результаты моделирования предложенных алгоритмов (6) и (7) в сравнении с алгоритмами, использующими регуляризацию [5, 6], а именно, алгоритмом Кейпона

$$P_{Capon-reg} = \frac{\mu^2\vec{V}^+X(X^+X + \mu I)^{-2}X^+\vec{V}}{(L - \vec{V}^+X(X^+X + \mu I)^{-1}X^+\vec{V})^2} \quad (9)$$

и Борджотти-Лагунаса

$$P_{BL-reg} = \frac{\mu^2\vec{V}^+X(X^+X + \mu I)^{-2}X^+\vec{V}}{(L - \vec{V}^+X(X^+X + \mu I)^{-1}X^+\vec{V}) - \mu\vec{V}^+X(X^+X + \mu I)^{-2}X^+\vec{V}}, \quad (10)$$

где  $\mu$  — параметр регуляризации. Моделируется обработка сигналов плоской АР, состоящей из 16 горизонтальных линеек по 64 гидрофона.

На рис. 1 и 2 приводятся развертки выходной мощности, отнесенной к выходной мощности распределенной помехи. Ситуация характеризуется наличием хорошо разрешающихся пяти тональных сигналов с отношением сигнал/шум слева направо: –40 дБ; –30 дБ; –20 дБ; –10 дБ и 0 дБ на элементе АР. На рис. 1 приведен общий вид разверток, на рис. 2 детализирована картина остаточных боковых лепестков.

Как видно из рис. 1, 2, в соответствии со свойствами рассматриваемых алгоритмов, для первого и второго сигналов, мощность которых не превосходит мощность распределенной помехи на выходе обзора, адаптивный эффект практически отсутствует.

Для третьего и четвертого сигналов, мощность которых по выходу обзора в десять и сто раз превосходит распределенную помеху, адаптивный эффект проявляется отчетливо, причем уровень остаточных боковых лепестков алгоритмов с регуляризацией практически одинаков как для линейных, так и квадратичных ограничений. Адаптивный эффект предложенных алгоритмов проявляется сильнее, чем у алгоритмов с регуляризацией. Уровень боковых лепестков существенно ниже. С ростом мощности проявляется преимущество алгоритма с квадратичными ограничениями по подавлению боковых лепестков.

Эффективное подавление пятого сигнала, превосходящего распределенную помеху в тысячу раз, обеспечивается всеми адаптивными алгоритмами при очевидном преимуществе предложенного варианта алгоритма с квадратичными ограничениями.

На рис. 3 представлены развертки в ситуации, когда в октавной полосе четыре сигнала мощностью –40 дБ на элементе расположены на угловом отстоянии в полторы ширины характеристики от сигналов мощностью –30; –20; –10 и 0 дБ. Демонстрируется лучшая разрешающая способность предложенных алгоритмов при безусловном преимуществе алгоритма с квадратичными ограничениями.

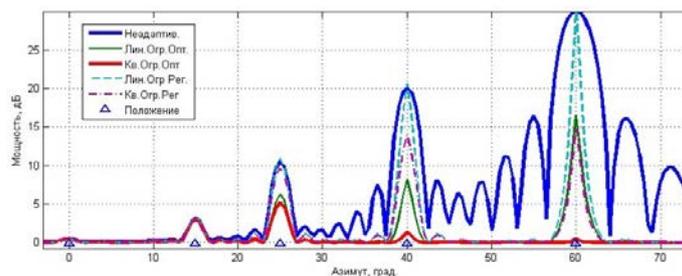


Рис. 1. Тестовая ситуация с пятью тональными сигналами. Общий вид.

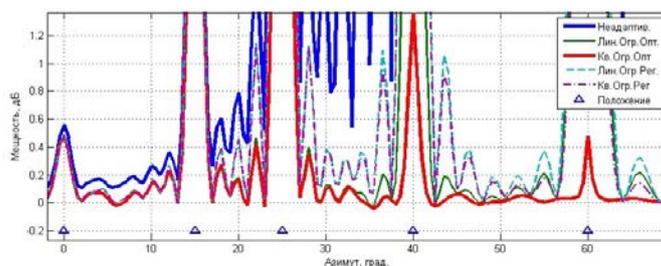


Рис. 2. Тестовая ситуация с пятью тональными сигналами. Детализация боковых лепестков.

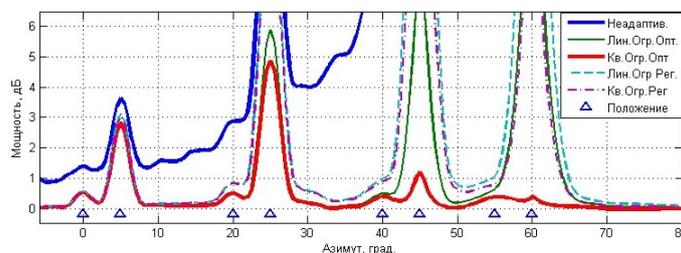


Рис. 3. Тестовая ситуация с широкополосными сигналами. Детализация.

**Выводы.** Предложен вариант реализации алгоритмов минимизации выходной мощности с линейными и квадратичными ограничениями, основанный на сочетании оценки сигнального пространства помех по выборке минимального размера и использовании априорного задания корреляционной матрицы фонового шума. Достигнуто преимущество по подавлению помех перед алгоритмами, использующими регуляризацию оценок корреляционных матриц.

Достигнуто для случая короткой выборки преимущество по разрешению слабых сигналов на фоне локальных помех алгоритма с квадратичными ограничениями над алгоритмом с линейными ограничениями.

Решение реализуется в пространстве элементов выборки, что обеспечивает простоту реализации и минимизирует объем вычислений.

### Литература

1. Малышкин Г. С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Адаптивные методы. СПб: Электроприбор, 2011. Т. 2.
2. Abramovich Y. A controlled method for adaptive optimization of filters using the criterion of maximum SNR // Radiotekh. Electron. (Radio Engineering Electronic Physics), 1981. Vol. 26, № 3. P. 87–95.
3. Du L., Li J., Stoica P. Fully Automatic computation of diagonal loading levels for robust adaptive beamforming // IEEE Aerospace ElectronSyst. 2010. Vol. 46, № 1. P. 449–458.
4. Мельканович В. С. Реализация алгоритмов с линейными ограничениями для многоэлементных гидроакустических антенных решеток в условиях малых выборок // Тр. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (ГА-2020). СПб.: Политех-Пресс, 2022. С. 92–95.
5. Мельканович В. С. Особенности построения адаптивной обработки сигналов по выходу цилиндрической антенной решетки с горизонтальной образующей // Мат. конф. «Управление в морских системах» (УМС-2020). СПб. 2020.
6. Melkanovich V. S. Features of implementation of adaptive signals processing for a cylindrical antenna array with a horizontal generatrix // J. of Physics: Conference Series (IOP). 2021. 8 С.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ, проект № 20-08-00130.

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КЛИНОВИДНОМ ВОЛНОВОДЕ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Б. А. Касаткин, д-р физ.-мат. наук, С. Б. Касаткин, канд. физ.-мат. наук  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Россия, Владивосток

## RESONANCE CONDITIONS IN WEDGE-SHAPED WAVEGUIDE AND ITS VERIFICATION IN SUBSONIC FREQUENCY RANGE

B. A. Kasatkin, Dr.Sc., S. B. Kasatkin, Ph.D.  
Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, Russia

*Выполнено экспериментальное исследование звуковых полей в скалярно-векторном описании, создаваемых движущимся источником. Для обнаружения малошумного источника на фоне шумов ближнего судоходства использована вертикальная антенна, оснащенная комбинированными приемниками (КП), помехоустойчивость которых существенно увеличена использованием алгоритмов обработки по полному набору информативных параметров, характеризующих скалярно-векторную структуру звукового поля. В диапазоне частот, больших первой критической частоты модельного волновода, выполнен спектральный анализ потоков мощности в каналах комбинированного приемника. По результатам спектрального анализа определен набор резонансных частот волновода переменной глубины, возбуждаемых дискретными составляющими вально-лопастного звукоряда шумового источника. Большая часть обнаруженных резонансов хорошо соответствуют обобщенному решению, построенному в рамках несамосопряжённой модельной постановки.*

*An experimental study of sound fields in a scalar-vector description created by a moving source is performed. To detect a low-noise source against the background of near-shipping noise, a vertical antenna equipped with combined receivers was used, the noise immunity of which was significantly increased by using processing algorithms for a full set of informative parameters characterizing the scalar-vector structure of the sound field. In the frequency range greater than the first critical frequency of the model waveguide, a spectral analysis of power flows in the channels of the combined receiver was performed. Based on the results of spectral analysis, a set of resonant frequencies of a waveguide of variable depth excited by discrete components of a roller-blade scale of a noise source is determined. Most of the detected resonances correspond well to the generalized solution constructed within the framework of a non-self-adjoint model formulation.*

При исследовании звуковых полей, формируемых реальными источниками в морском эксперименте, важная роль отводится корректному сопоставлению результатов эксперимента его модельному описанию. Модельное описание звуковых полей в реальной морской среде строится на основе модельного волновода Пекериса, введенного в пионерской работе [1], и имеет вид разложения по собственным функциям некоторого несамосопряженного оператора. Однако решение граничной задачи (ГЗ), предложенное Пекерисом, оказалось корректным только для описания звукового поля в самом волноводе, но не в полупространстве, где амплитуда вытекающих волн (leakagewaves) комплексного спектра экспоненциально растет с глубиной. Видимо, по этой причине более привлекательным оказалось решение ГЗ в классе аналитических функций, но в самосопряженной модельной постановке, полученное в работе [2]. Это решение корректно во всей области определения волновод — полупространство, за исключением оси симметрии, где оно оказывается сингулярным.

Обобщенное решение с использованием собственных функций двух сопряженных операторов было предложено в работе [3]. Характерная особенность обобщенного решения, которая отличает его от классического решения, заключается в наличии непрерывного по частоте перехода вытекающих нормальных волн семейства  $n(3)$  комплексного спектра с волновыми числами  $(\xi, -\xi^*)$ , формирующих стоячую волну в волноводе, в нормальные волны семейств  $n(1)$ ,  $n(2)$ , захваченные волноводом (обозначение волн соответствует принятому в работе [3]). Этот переход происходит на частотах продольного резонанса, которые являются кратными корнями дисперсионного уравнения. Для реализации продольного резонанса в волноводе необходимо появление в суммарном решении обратных волн с положительно определенной групповой скоростью. Такой механизм хорошо известен в теории твердых волноводов типа стержней, пластин, цилиндров со свободной поверхностью, в которых квази-поперечные волны зарождаются на частотах поперечного антирезонанса, квази-продольные волны зарождаются на

частотах продольного резонанса, а сами граничные задачи для твердых волноводов всегда описываются несамосопряженным оператором. Единство механизма формирования волнового движения в жидких и твердых волноводах свидетельствует о том, что само явление продольного резонанса в волноводах, не ограниченных в направлении распространения волнового движения, является фундаментальным явлением.

Модельное описание продольных резонансов в клиновидном волноводе с малым углом раскрытия дано в работе [4], там же описано экспериментальное подтверждение этого интересного явления. Схема формирования первой пары нормальных волн, регулярной и обобщенной, поясняется рис. 1. Продольный резонанс реализуется одновременным возбуждением двух обобщенных нормальных волн на частоте резонанса  $\chi_p$ , для одной из которых  $1(2)$  фазовая и групповая скорости являются положительно определенными, а другая волна  $\bar{2}(2)$  является обратной волной с положительно определенной групповой скоростью. С повышением частоты обобщенная волна  $1(2)$  остается в своем классе, а обратная волна  $\bar{2}(2)$  трансформируется на частоте трансформации  $\chi_{тр}$  в регулярную волну  $2(1)$ . При дальнейшем повышении частоты фазовая и групповая скорости этой волны растут одновременно, достигая на частоте поперечного антирезонанса  $\chi_{ар}$  своего максимального значения, равного скорости звука в полупространстве ( $c_{ф}=c_{г}=c_2$ ). При дальнейшем повышении частоты и при условии  $\chi \geq \chi_0$  обобщенная волна  $1(2)$  становится неоднородной волной, фазовая и групповая скорости которой асимптотически стремятся к скорости  $c_0 < c_1$ . Эта скорость соответствует нулю коэффициента отражения границы раздела вода–морское дно, который реализуется в области комплексных углов падения. В классическом решении процесс зарождения нормальных волн в волноводе начинается с частоты поперечного антирезонанса, который реализуется на дискретном множестве значений частотного параметра  $(k_l h)_{ар,п}$ . На этих частотах входной импеданс полупространства становится бесконечно большим, а амплитуда зарождающейся нормальной волны равна нулю.

Принципиальное различие процесса зарождения нормальных волн в волноводе в классическом и обобщенном описании также может стать предметом экспериментальных исследований с целью верификации самих модельных решений. Эксперимент проводился на акватории Уссурийского залива Японского моря в августе 2021 г. в присутствии интенсивных шумов ближнего судоходства. В качестве источника сигнала использовались дискретные составляющие вально-лопастного звукоряда (ВЛЗР) и шумы обтекания НИС «Юрий Молоков» (катамарана).

В качестве приемной системы использовалась вертикально ориентированная 3-х элементная антенна, приемные модули которой были оснащены КП. Процедура резонансного возбуждения существенно упрощается в клиновидном волноводе, глубина которого плавно изменяется в некотором диапазоне глубин, а звуковое поле возбуждается дискретными составляющими ВЛЗР катамарана, образующими достаточно плотный набор частот с шагом  $\Delta f = 0,7$  Гц. Кроме того, клиновидность волновода приводит к тому, что одному и тому же значению резонансного параметра  $\chi_{p,n}$  соответствуют различные комбинации частоты и глубины волновода.

На рис. 2 представлена частотная зависимость спектральной плотности мощности (СПМ,  $\text{Па}^2 \text{ Гц}^{-1}$ ) в каналах КП, усредненная за время прохода катамарана траверсной точки. Во всех каналах КП хорошо выделяются резонансные частоты в диапазоне 13–20 Гц, соответствующие первому значению частотного параметра  $\chi_{p1}$ , но различным значениям глубины волновода  $h_m$  в диапазоне глубин 30–50 м, соответствующих экспериментальной трассе. Для других значений частотного параметра  $\chi_{p,n}$ , соответствующих продольным резонансам более высокого порядка и выделенному набору глубин  $h_m$  в диапазоне глубин 30–50 м, будут соответствовать резонансные частоты  $f_{mn}$ , которые должны наблюдаться на частотной зависимости СПМ в каналах КП.

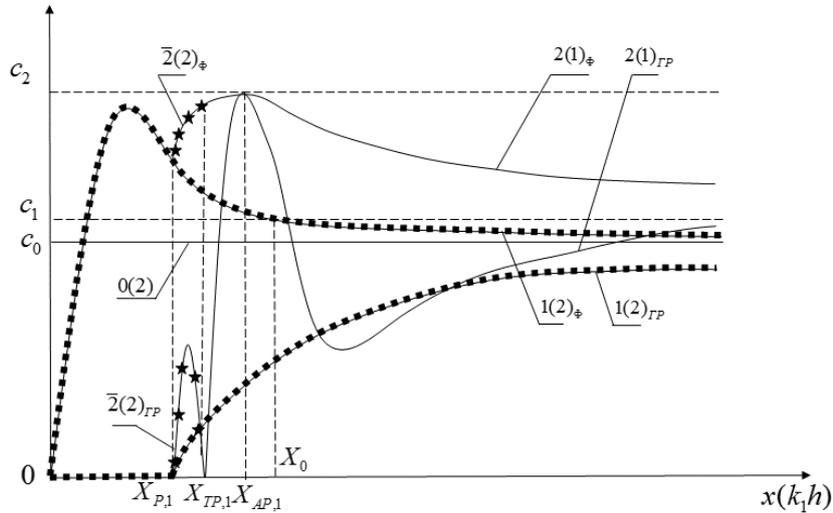


Рис. 1. Схема формирования первой пары нормальных волн.

$x_p$  — частота продольного резонанса;  $x_{тр}$  — частота трансформации;  
 $x_{ар}$  — частота поперечного антирезонанса.

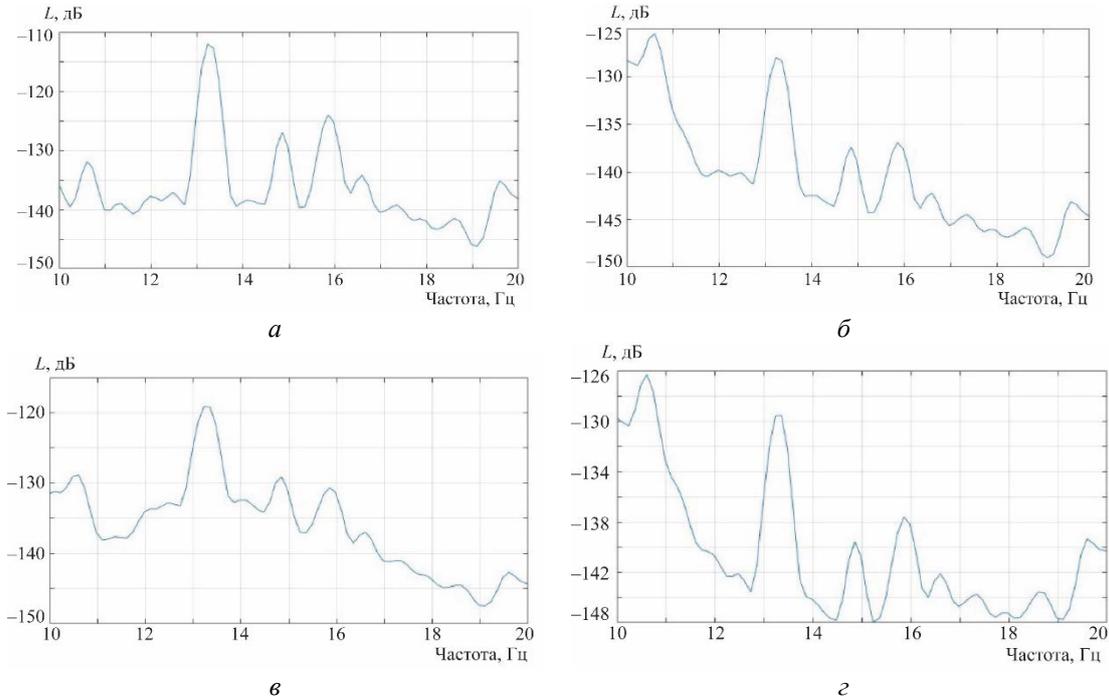


Рис. 2. СПМ в каналах КП.

$a$  —  $Ir^2$ ;  $б$  —  $I_x$ ;  $в$  —  $I_y$ ;  $г$  —  $I_z$  в диапазоне частот 10–20Гц.

Рис. 3 поясняет частотную зависимость СПМ в каналах КП в диапазоне частот 20–200 Гц. Можно отметить практически полное соответствие модельных и экспериментальных значений резонансных частот в широком диапазоне частот 10–200 Гц, а небольшое их несоответствие легко устраняется незначительным изменением глубины волновода  $h_m$ , рассчитанных первоначально по значению первого частотного параметра  $x_{p,1}$  и набору экспериментальных резонансных частот в диапазоне 10–20 Гц. Характерно, что максимальный по уровню продольный резонанс на частоте 102 Гц реализуется совместным возбуждением пятой гармоники в волноводе глубиной 34,5 м и седьмой гармоники в волноводе глубиной 48 м. Следующий по уровню дуплет резонансных частот 88 Гц и 93 Гц реализуется совместным возбуждением продольного резонанса, соответствующего пятой гармонике, в волноводе глубиной 40 м и в волноводе глубиной 38 м. Слияние отдельных резонансов приводит к эффекту широкополосного

возбуждения клиновидного волновода в некоторой полосе частот в диапазоне 130–200 Гц и к формированию глобального максимума уровня СПМ в диапазоне частот 50–200 Гц.

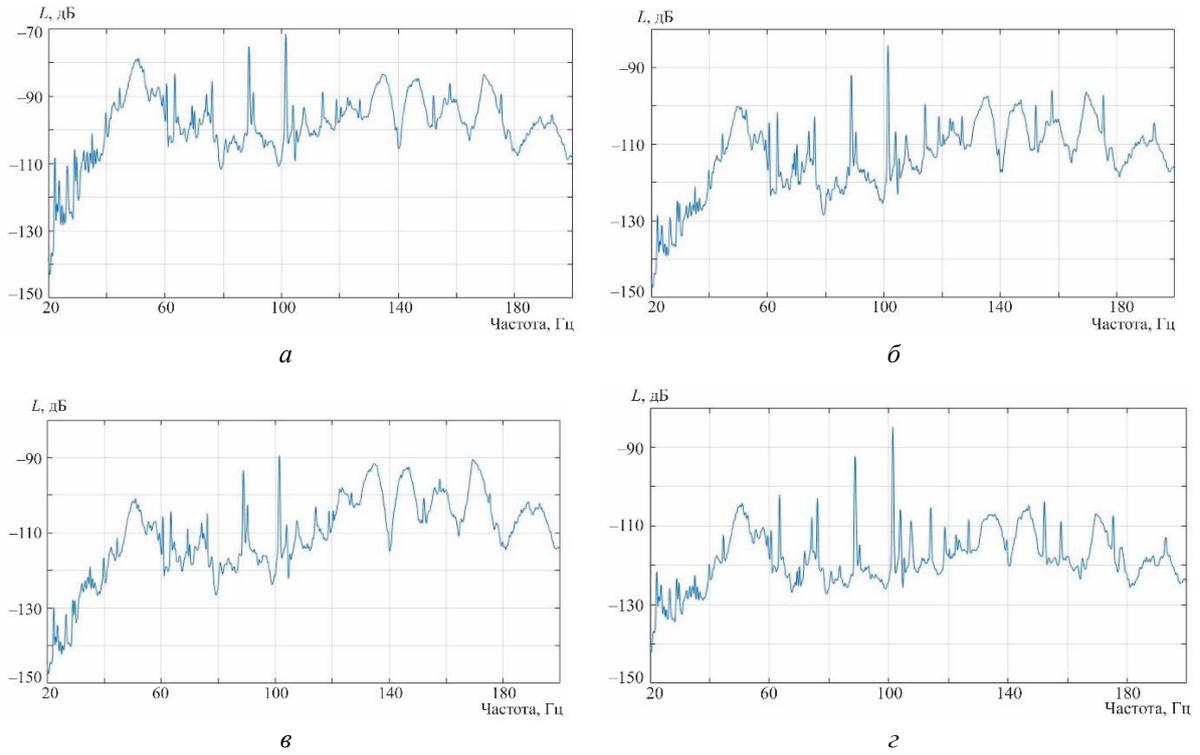


Рис. 3. СПМ в каналах КП.

*a* —  $I_{rI^2}$ ; *б* —  $I_x$ ; *в* —  $I_y$ ; *г* —  $I_z$  в диапазоне частот 20–200 Гц.

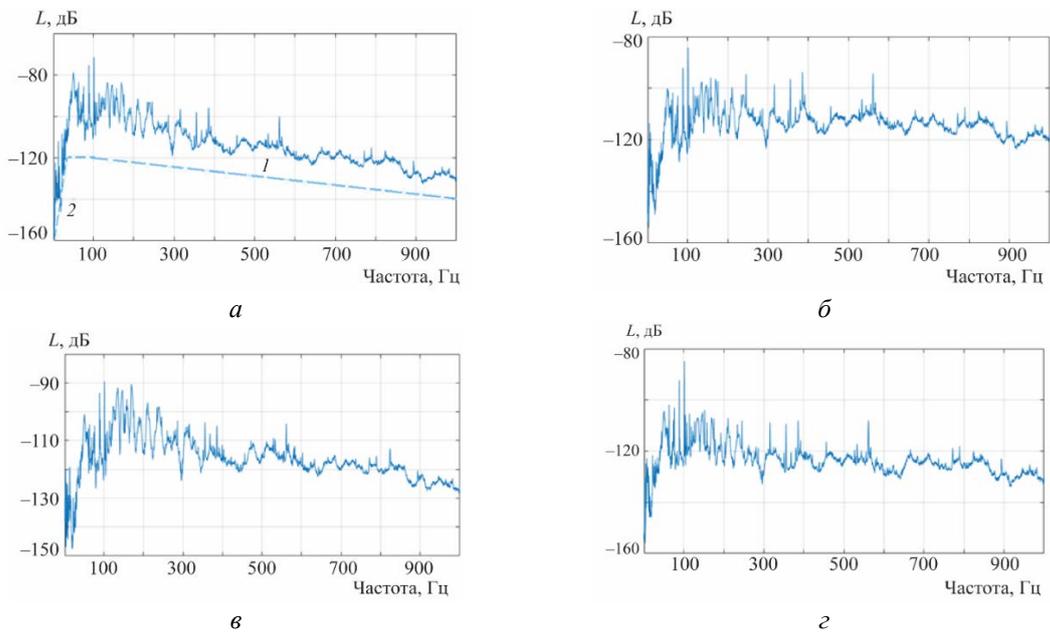


Рис. 4. Спектральная плотность мощности в каналах КП.

*a* —  $I_{rI^2}$ ; *б* —  $I_x$ ; *в* —  $I_y$ ; *г* —  $I_z$  в диапазоне частот 1,0–1000 Гц.

Общий вид частотной зависимости СПМ в каналах КП в звуковом поле движущегося шумового источника поясняется рис. 4 в диапазоне частот 1,0–1000 Гц. Можно отметить, что большая часть значимых продольных резонансов волновода лежит в диапазоне частот 10–200 Гц и хорошо соответствует модельным оценкам резонансных частот. Штриховая линия 1 на рис. 4, *a* (для канала звукового давления) соответствует усредненному закону –20 дБ на декаду, характерному (по Кнудсену) для фоновых шумов моря в звуковом диапазоне частот ( $f > 100$  Гц). Штриховая линия 2 соответствует закону +20 дБ на декаду в инфразвуковом диапазоне частот (1,0–100 Гц), характерному для усредненных в частотной области шумов катамарана. Формирование глобального максимума СПМ(Д) в диапазоне частот 50–200 Гц, на наш взгляд, связано именно с возбуждением продольных резонансов в нерегулярном волноводе, каким является мелкое море переменной глубины, дискретными составляющими ВЛЗР надводных судов. С увеличением глубины моря диапазон частот, в котором происходит формирование глобального максимума СПМ(Д), смещается в сторону низких и сверхнизких частот сейсмоакустики, а закон –20 дБ на декаду становится доминирующим усредненным законом в широком диапазоне частот 1,0– $10^4$  Гц в шумовом поле звукового давления.

#### *Литература*

1. Pekeris C. L. Theory of propagation of explosive sound in shallow water // Geol. Soc. Am. Mem. 1948. № 27. P. 48–156.
2. Бреховских Л. М. О поле точечного излучателя в слоисто-неоднородной среде // Изв. АН СССР. Серия физич. 1949. Т. 13, № 5. С. 505–545.
3. Касаткин Б. А., Злобина Н. В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. М.: Наука, 2009. 496 с.
4. Касаткин Б. А., Злобина Н. В., Касаткин С. Б. Модельные задачи в акустике слоистых сред. Владивосток: Дальнаука, 2012. 254 с.

## МОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ЗАДАЧ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ В МЕЛКОМ МОРЕ В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Б. А. Касаткин, д-р физ.-мат. наук, Н. В. Злобина, д-р физ.-мат. наук, С. Б. Касаткин, канд. физ.-мат. наук  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Россия, Владивосток

## MODEL SOLUTIONS OF THE BOUNDARY VALUE PROBLEMS AND ITS VERIFICATION IN SHALLOW SEA IN THE SUBSONIC FREQUENCY RANGE

B. A. Kasatkin, Dr.Sc., N. V. Zlobina, Dr.Sc., S. B. Kasatkin, Ph.D.  
Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, Russia

*Получено обобщённое решение граничной задачи для волновода типа жидкий слой – твёрдое полупространство в несамосопряжённой модельной постановке в диапазоне частот, меньших первой критической частоты модельного волновода. Отмечены принципиальные отличия обобщённого решения от классического решения, полученного в самосопряжённой модельной постановке. Выполнено экспериментальное исследование звуковых полей в скалярно – векторном описании, создаваемых движущимся шумовым источником. Выполнена верификация модельных решений граничной задачи, обобщённого и классического, путём сравнения параметров вертикальной структуры скалярно-векторных звуковых полей и вихревой структуры векторных полей с экспериментальными данными. Экспериментальные данные однозначно подтверждают предпочтительность обобщённого решения.*

*A generalized solution of the boundary value problem for a liquid layer – solid half-space waveguide in a non-self-adjoint model formulation in the frequency range less than the first critical frequency of the model waveguide is obtained. The principal differences between the generalized solution and the classical solution obtained in the self-adjoint model formulation are noted. An experimental study of sound fields in a scalar–vector description created by a moving noise source has been performed. The verification of the model solutions of the boundary value problem, generalized and classical, is carried out by comparing the parameters of the vertical structure of scalar-vector sound fields and the vortex structure of vector fields with experimental data. Experimental data unequivocally confirm the preference of the generalized solution.*

При описании звуковых полей в рамках решения граничной задачи (ГЗ) для модельного волновода важную роль играет выбор модельной постановки, самосопряжённой или несамосопряжённой. Различие соответствующих модельных решений проявляется в наибольшей степени на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода. В этом диапазоне частот звуковое поле формируется, в основном, неоднородными волнами, число которых зависит от выбора модельной постановки и модельного волновода. Учитывая большую глубину проникновения звуковой волны в донное полупространство на частотах инфразвукового диапазона, в качестве модельного волновода следует выбрать волновод типа жидкий слой–твёрдое полупространство. В классическом решении ГЗ, полученном в самосопряжённой модельной постановке, звуковое поле в этом диапазоне частот описывается одной неоднородной волной — пограничной волной Рэлея-Шолте, локализованной на границе раздела вода-морское дно. Эту волну, расходящуюся во всей области определения, будем называть регулярной волной. В обобщённом решении ГЗ, полученном в несамосопряжённой модельной постановке, звуковое поле в этом диапазоне частот описывается тремя неоднородными волнами. Первая из них — регулярная волна Рэлея-Шолте. Вторая из них — обобщённая (гибридная) расходящаяся волна Рэлея-Шолте, локализованная на горизонте полного внутреннего отражения в полупространстве, где она трансформируется в сходящуюся волну отдачи. Пара волн, формирующих обобщённую (гибридную) волну, являются собственными функциями двух сопряжённых операторов. Третья составляющая-обобщённая (гибридная) волна Шолте, локализованная на горизонте источника, возбуждаемая комплексным уловым спектром модельного (точечного) источника. Эта волна, соответствующая обобщённому решению характеристического уравнения для границы раздела жидкого и твёрдого полупространств, впервые рассмотрена теоретически и обнаружена экспериментально в работах [1, 2]. Различие вертикальной структуры звуковых полей в классическом и обобщённом описании может служить основой верификации модельных решений. Для эффективного приёма слабых сигналов на фоне анизотропной составляющей шумовой помехи необходимо увеличивать помехоустойчивость приёмной системы, желательно,

без увеличения её апертуры, что крайне важно при работе в инфразвуковом диапазоне частот. Наибольшая помехоустойчивость в этом случае реализуется при использовании в качестве приёмной системы комбинированных приёмников (КП) и алгоритмов обработки полного набора информативных параметров, характеризующих скалярно-векторную структуру звукового поля. Полный набор 16 параметров, характеризующих скалярно-векторную структуру звукового поля, был назван в работе [3] в виде компонент тензора второго ранга — тензора плотности потока мощности. Достаточно подробно обобщённое решение ГЗ для волновода типа жидкий слой–твёрдое полупространство рассмотрено в работах [4–7]. Рис. 1 поясняет дисперсионные характеристики этой тройки волн и эюры функций поперечного сечения с указанием типа сопряжённых волн, расходящихся и сходящихся, формирующих звуковое поле на частотах, меньших первой критической частоты модельного волновода. На рис. 1 функция  $p_{01}(z)$  относится к неоднородной регулярной волне Рэля-Шолте, локализованной на границе раздела вода–морское дно. Функция  $p_{02}(z)$  относится к неоднородной обобщённой волне Рэля-Шолте, локализованной на горизонте полного внутреннего отражения  $z=z_n$  в полупространстве. Функция  $p_{03}(z)$  относится к неоднородной обобщённой волне Шолте, локализованной на горизонте источника  $z=z_0$ .

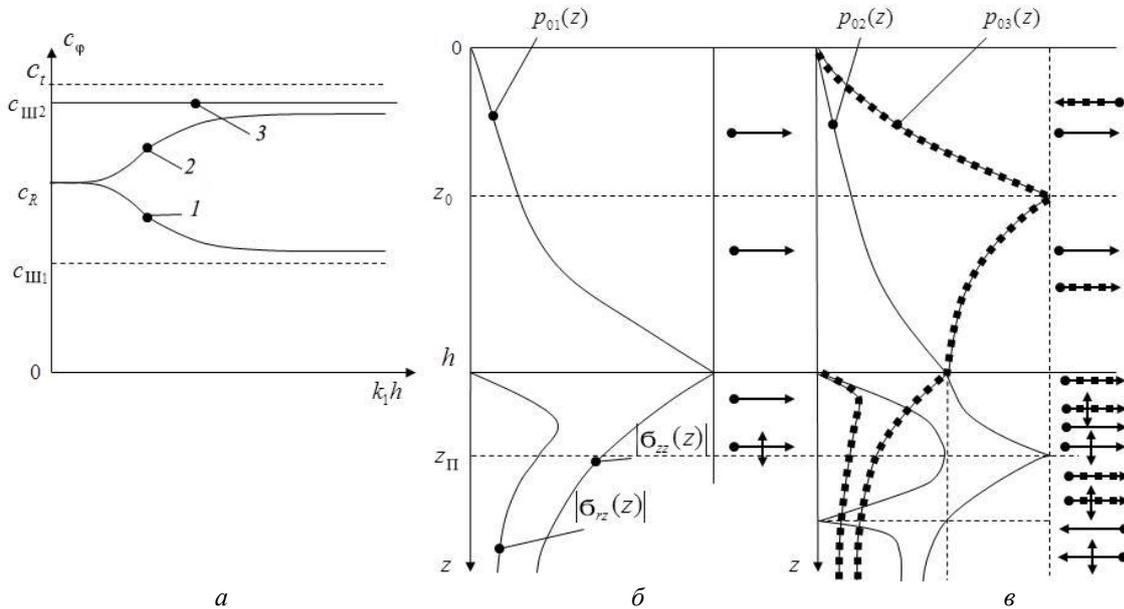


Рис. 1. Дисперсионные характеристики и функции поперечного сечения мод нулевого порядка  $p_{01}(z)$ ,  $p_{02}(z)$ ,  $p_{03}(z)$ .

$a$  — дисперсионные характеристики;  $b$  — функции поперечного сечения;  $c$  — моды нулевого порядка  $p_{01}(z)$ ,  $p_{02}(z)$ ,  $p_{03}(z)$

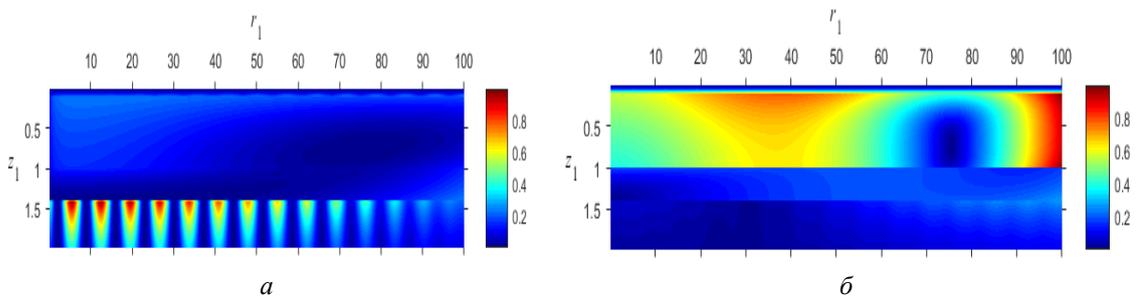


Рис. 2. Обобщённое решение (жидкий слой–твёрдое полупространство).

$k_1 h = 0,25$ ;  $z_{01} = 0,1$ ;  $a$  —  $p^2(r, z)$ ;  $b$  —  $\Pi(r, z)$ .

На рис. 2 все функции, характеризующие энергетическую структуру звукового поля, умножены на радиальную координату  $r$  (для исключения цилиндрической расходимости потоков мощности) и нормированы на своё максимальное значение. Пространственные координаты нормированы на глубину волновода  $h$ . На рис. 2 хорошо видна интерференционная структура звукового поля, образованная тройкой волн, волн Рэлея-Шолте, регулярной и обобщённой, и волной Шолте с характерной пространственной локализацией поля либо на горизонте источника  $z=z_0$ , либо на границе раздела вода–морское дно  $z=h$ , либо на горизонте полного внутреннего отражения  $z=z_n$ . На предельно низких частотах инфразвукового диапазона ( $k_1h=0,25$ ) поле квадрата звукового давления (скалярной интенсивности) локализуется либо на горизонте источника  $z=z_0$ , либо на горизонте полного внутреннего отражения  $z=z_n$ . Ниже этого горизонта звуковое поле имеет характер стоячей волны, образованной интерференцией встречных волн Рэлея-Шолте, регулярной и обобщённой. Кроме того, в срединной части волновода формируются вихревые структуры с нулём звукового давления в узловых точках ( $r_1=75, z_1=0,77$ ). Поле модуля вектора интенсивности локализовано либо вблизи горизонта источника, либо вблизи границы раздела вода–морское дно. Кроме того, в поле вектора интенсивности формируются седловые точки ( $r_1=75,5, z_1=0,73$ ), соответствующие нулю вектора интенсивности.

Важно отметить, что локализация звукового поля на горизонте источника непосредственно связана с обобщённой волной Шолте, которая отсутствует в классическом решении граничной задачи. Принципиальное отличие вертикальной структуры скалярных и векторных полей в классическом и обобщённом решении заключается именно в дополнительной локализации векторного поля вблизи горизонта источника. При увеличении расстояния максимум звукового поля смещается на границу раздела вода – морское дно, что экспериментально подтверждено в работах [4–7].

Эксперимент проводился на акватории Уссурийского залива в августе месяце 2021 г. в присутствии интенсивных шумов ближнего судоходства. В качестве источника сигнала использовались дискретные составляющие вально — лопастного звукоряда (ВЛЗР) и шумы обтекания НИС «Юрий Молоков» (катамарана). В качестве приёмной системы использовалась вертикально ориентированная 3-х элементная антенна, приёмные модули которой оснащены КП. Глубина моря в месте постановки приёмной системы составляла 48 м, приёмные модули ПМ-1, ПМ-2, ПМ-3 располагались на глубине  $z_1=18$  м,  $z_1=28$  м,  $z_1=38$  м соответственно. Максимальное удаление катамарана от приёмной системы составляет 5,6 км. Обработки данных связана с анализом пространственно-частотной структуры звукового поля на апертуре вертикальной антенны и вихревой структуры звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот. На этом этапе суммарный процесс (S+N) разделяется на сигнал (S) и помеху (N), затем методами спектрального анализа вычисляется полный набор информативных параметров, характеризующих скалярно-векторную структуру звукового поля:

$$A_1 = p^2; A_2 = I_x; A_3 = I_y; A_4 = I_z; A_5 = I_{2x}; A_6 = I_{2y}; A_7 = I_{2z}; A_8 = \text{rot}_x \bar{I}; A_9 = \text{rot}_y \bar{I}; A_{10} = \text{rot}_z \bar{I};$$

$$A_{11} = g_{1x}^2; A_{12} = g_{1y}^2; A_{13} = g_{1z}^2; A_{14} = g_{2x}^2; A_{15} = g_{2y}^2; A_{16} = g_{2z}^2,$$

где  $\mathbf{I} = \mathbf{I}_1 + i\mathbf{I}_2$  — комплексный вектор интенсивности;  $\mathbf{g} = \mathbf{g}_1 + i\mathbf{g}_2$  — комплексный вектор градиента давления.

Эти параметры эквивалентны, но не равны тождественно, параметрам тензора плотности потока мощности, введённого в работе [3]. Подробное описание методики обработки содержится в работах [4–7]. По результатам обработки вычисляется отношение (S/N) на выходе канала звукового давления и на выходе блока обработки сигналов (БОС) по всем информативным параметрам. Результаты обработки поясняются на рис. 3, 4.

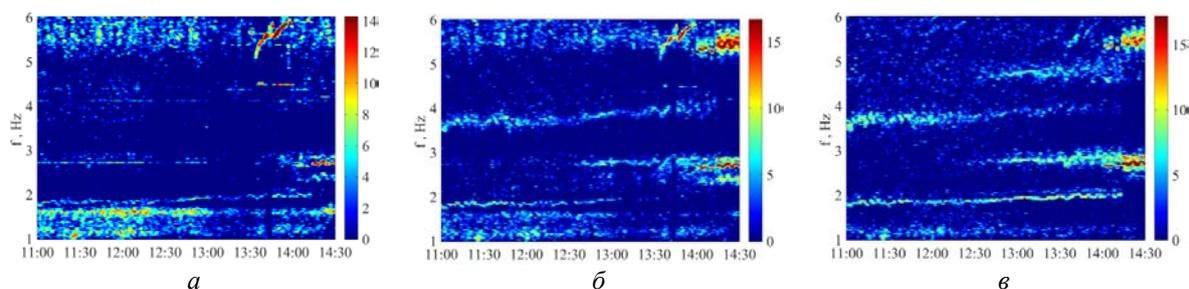


Рис. 3. Сонограммы для отношения (S/N) в канале звукового давления.

*a* — ПМ-1; *б* — ПМ-2; *в* — ПМ-3.

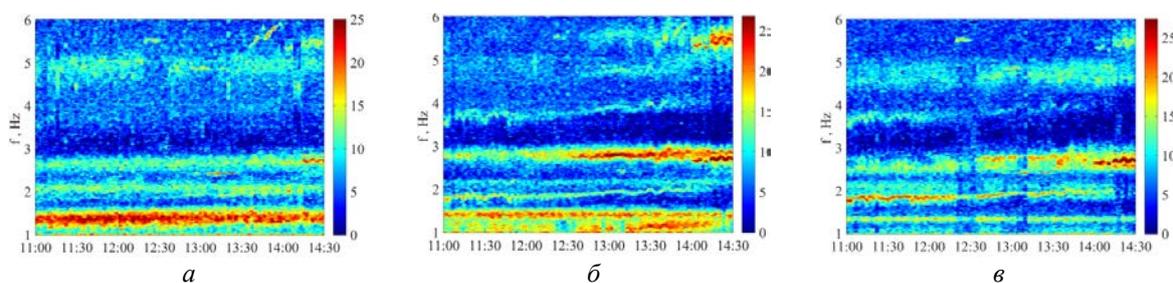


Рис. 4. Сонограммы для отношения (S/N) на выходе БОС.

*a* — ПМ-1; *б* — ПМ-2; *в* — ПМ-3.

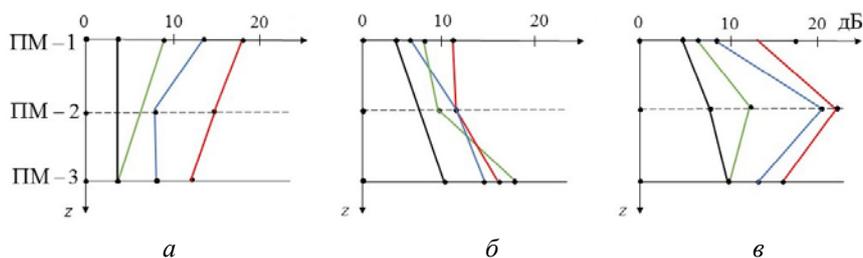


Рис. 5. Эпюры вертикального распределения отношения (S/N) для звукового давления, модуля вещественной составляющей вектора интенсивности, модуля ротора вектора интенсивности и модуля вектора градиента давления.

Чёрный цвет — эпюры вертикального распределения отношения для звукового давления; зелёный — модуля вещественной составляющей вектора интенсивности; синий — модуля ротора вектора интенсивности; красный — модуля вектора градиента давления; *a* —  $f=1,4$  Гц; *б* —  $f=2,1$  Гц; *в* —  $f=2,8$  Гц.

Можно отметить эффективность обработки всей скалярно-векторной информации, которая позволяет увеличить потенциальную помехоустойчивость (в определении работы [3]) КП до 20–25 дБ. Пространственная структура звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот 1,0–6,0 Гц имеет явно выраженную вертикальную стратификацию, обусловленную тем, что неоднородная волна Шолте локализована на горизонте источника, а неоднородные волны Рэля-Шолте, регулярная и обобщённая, локализованы вблизи границы раздела вода–морское дно. Кроме того, вихревая составляющая вектора интенсивности является характерным признаком обобщённого решения, в котором звуковое поле формируется тремя неоднородными волнами. В классическом решении звуковое поле формируется одной неоднородной волной, а вихревая составляющая в одномодовом поле отсутствует. Вертикальные структуры всех составляющих суммарного векторного поля подобны и хорошо соответствуют модельному описанию звукового поля, полученному в несамосопряжённой модельной постановке [4–7]. Кроме того, вихревая составляющая вектора интенсивности присутствует в обобщённом решении, представленном тремя интерферирующими модами, и отсутствует в классическом

решении, представленном одной неоднородной волной Рэлея-Шолте. Эта особенность обобщённого решения также может быть использована для верификации модельных решений. Выполненная верификация модельных решений, обобщённого и классического, однозначно подтверждает предпочтительность обобщённого решения.

*Литература*

1. Padilla F., de Billy M., Quentin G. Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the fluid sound velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // J. Acoust. Soc. Am. 1999. Vol. 106(2). P. 666–673.
2. Ansell J. H. The roots of the Stoneley wave equation for liquid-solid interfaces // Pure Appl. Geophys. 1972. Vol. 194. P. 172–188.
3. Гордиенко В. А. Векторно-фазовые методы в акустике. М.: Физматлит, 2007, 479 с.
4. Касаткин Б. А., Злобина Н. В., Касаткин С. Б., Злобин Д. В., Косарев Г. В. Акустика мелкого моря в скалярно – векторном описании. Теория и эксперимент. Владивосток. 2019. 360 с.
5. Касаткин Б. А., Касаткин С. Б. Скалярно-векторная структура и кинематические характеристики звукового поля в инфразвуковом диапазоне частот // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 3. С. 71–85.
6. Касаткин Б. А., Злобина Н. В., Касаткин С. Б. Модельное описание и экспериментальное исследование звуковых полей инфразвукового диапазона в мелком море (обзор) // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 3(37). С. 59–72.
7. Касаткин Б. А., Злобина Н. В., Касаткин С. Б. Пограничные волны в проблеме обнаружения подводных источников шума // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4(30). С. 37–48.

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПОДВОДНОГО ИСТОЧНИКА ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМА НА ОСНОВЕ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННО-СКОРОСТНЫХ ПОРТРЕТОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Д. А. Никитин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А. А. Родионов<sup>1,2</sup>, чл.-корр. РАН

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

## LOCALIZATION OF A MOVING UNDERWATER BROADBAND NOISE SOURCE BASED ON ITS SPATIAL-VELOCITY PORTRAITS IN THE FREQUENCY DOMAIN

D. A. Nikitin<sup>1</sup>, Ph.D., A. A. Rodionov<sup>1,2</sup> corresponding member of RAS

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg Research Center of RAS, St. Petersburg, Russia

*Рассматривается возможность локализации движущегося подводного источника широкополосного шума за счёт сравнения спектрограммы сигналов, принимаемых одиночным гидрофоном с набором пространственно-скоростных портретов источника, зависящих от глубины и скорости движения источника, а также взаимного расположения источника и приёмника. Показано влияние уровня шумовой помехи на работоспособность данного метода.*

*The possibility of localization of a moving underwater broadband noise source is considered by comparing the spectrogram of signals received by a single hydrophone with a set the source spatial-velocity portraits, depending on the source depth and speed, as well as the source and receiver relative location. The noise interference level influence on the method efficiency is shown.*

При проведении натуральных экспериментов довольно часто возникает задача локализации движущегося подводного источника широкополосного шума с целью оценки результатов экспериментов. Эта задача может быть решена путём обработки сигналов от одиночного гидрофона, размещённого в районе проведения экспериментов. При движении источника широкополосного шума в мелком море происходят многократные отражения излучаемых им сигналов от дна и поверхности, вследствие чего в пространстве формируется устойчивая интерференционная частотно-временная структура сигнала, перемещающаяся вместе с источником. При определённых условиях: изотермия, малые расстояния между источником и гидрофоном, низкие частоты, допустима модель однородного волновода с постоянной скоростью звука [1]. В этом случае поле широкополосного шумового источника, принимаемого одиночным гидрофоном, может быть рассчитано методом мнимых источников [2]. Для определённости приняты следующие параметры: глубина моря 300 м; скорость звука 1500 м/с; коэффициент отражения от морской поверхности — 1; коэффициент отражения от дна — 0,5; глубина гидрофона 50 м; глубина источника 70 м.

На рис. 1 представлены спектрограммы амплитуд гидроакустических сигналов от источника, движущегося со скоростью: *а* — 3 м/с на кратчайшем расстоянии от гидрофона 2 км; *б* — 5 м/с на кратчайшем расстоянии от гидрофона 1,4 км.

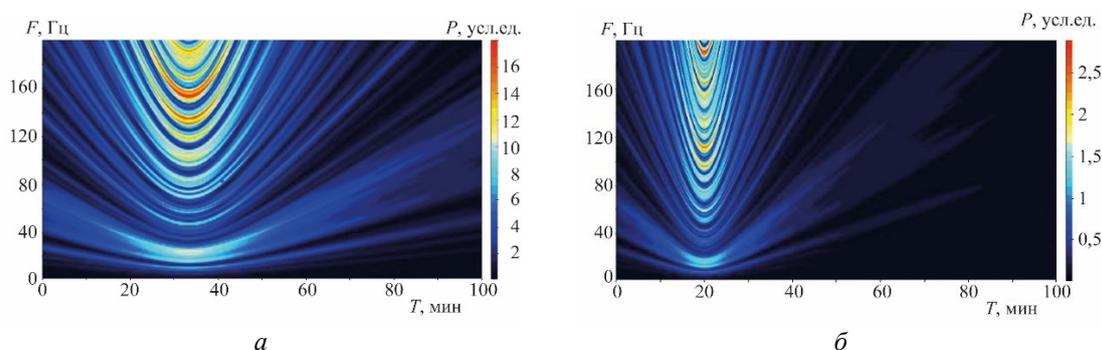


Рис. 1. Спектрограммы амплитуд гидроакустических сигналов источника шума.

Они представляет собой пространственно-скоростные портреты источника шума в частотной области для выбранных условий. В зависимости от глубины моря, глубин источника и приёмника, скорости источника, кратчайшего расстояния между источником и приёмником условия суммирования сигналов будут различными и пространственно-скоростные портреты источника шума для них будут уникальными.

Идея локализации источника шума заключается в том, что необходимо сформировать набор портретов и сравнить их со спектрограммой принятого сигнала. Если участок спектрограммы совпадает с каким-либо портретом, то можно предположить, что параметры движения источника соответствуют параметрам, по которым сформирован этот портрет. Количество портретов определяется их набором для трёх параметров: глубина, скорость движения источника и кратчайшее расстояние между источником и приёмником, дискретно изменяемых от минимальных до максимальных значений. Если глубина или скорость движения источника точно известны, то количество портретов соответствующим образом уменьшается. Обработка сигналов осуществляется следующим образом. Из принятых гидрофоном сигналов формируется спектрограмма. На участок этой спектрограммы последовательно накладываются портреты источника шума и производится поэлементное перемножение отсчётов портрета и участка спектрограммы. После суммирования перемноженных отсчетов для каждого портрета — аналога пространственного фильтра получаем четырёхмерный выходной эффект  $Q_{i,j,k,l}$ , где  $i$  — номер фильтра по глубине;  $j$  — по скорости;  $k$  — по кратчайшему расстоянию;  $l$  — номер временного отсчёта. Далее участок спектрограммы смещается на один отсчёт по времени и для каждого фильтра получаем  $Q_{i,j,k,l+1}$ . Обработка производится непрерывно по мере поступления новых спектральных отсчётов. Локализация шумового источника осуществляется по факту появления в одном или в нескольких соседних фильтрах выраженного максимума, превышающего уровни выходных эффектов в других фильтрах.

Проведено моделирование движения источника шума для различных глубин, скоростей движения и кратчайших расстояний до приёмника при воздействии шумовых помех различного уровня. В качестве иллюстраций ниже представлены результаты обработки сигналов шумового источника, движущегося на глубине 70 м со скоростью 3 м/с на кратчайшем расстоянии от приёмника 2 км. На рис. 2 приведены спектрограмма и временная зависимость дисперсии сигналов («кривая прохода») источника шума при воздействии помехи давлением  $P$ . Спектрограмма позволяет выявить на фоне шумовой помехи пространственно-временную интерференционную структуру шумового сигнала источника, сходную со спектрограммой его портрета, представленной на рис. 1, а. По спектрограмме легко определяется момент прохода источником кратчайшего расстояния до приёмника 33 мин. «Кривая прохода» позволяет уверенно зарегистрировать факт прохода источника и определить момент прохода источником кратчайшего расстояния до приёмника.

На рис. 3 показаны величины эффектов на выходе набора фильтров по глубинам 7, 70 и 100 м; по скорости от 2-х до 5-ти м/с; по кратчайшему расстоянию от 0,2 до 4 км.

В фильтре, соответствующем глубине 70 м и скорости 3 м/с, в момент времени 33 мин. наблюдается чёткий максимум, что полностью совпадает с параметрами движения источника, заданными при моделировании.

На рис. 4 показаны величины выходных эффектов для набора фильтров по глубине 70 м, по скорости 3 м/с, по кратчайшим расстояниям от 200 м до 4 км с дискретностью 200 м. В фильтре, соответствующем кратчайшему расстоянию 2 км, виден максимум, подтверждающий взаимное расположение приёмника и источника, заданное при моделировании.

Влияние помехи наглядно демонстрируется результатами, представленными на рис. 5–7. На них изображены те же данные, что и на рис. 2–4, но при воздействии шумовой помехи, давление которой в 5 раз больше первоначальной.

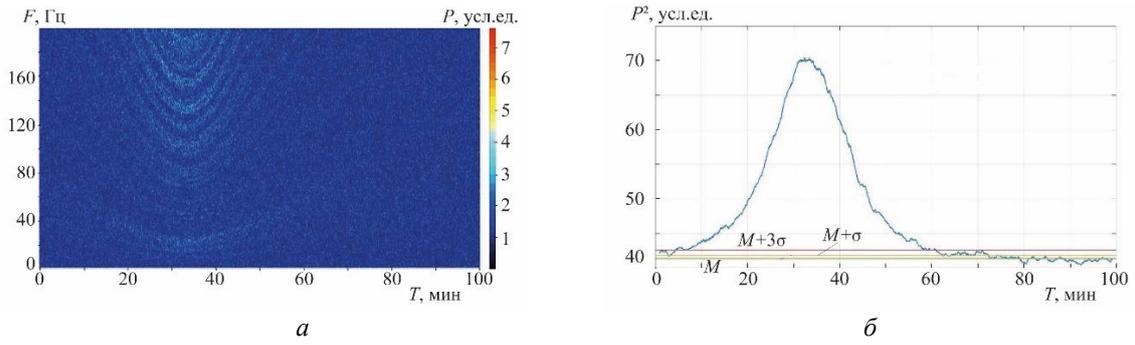


Рис. 2. Спектрограмма и «кривая прохода» источника шума при воздействии помехи давлением  $P$ .

$a$  — спектрограмма;  $b$  — «кривая прохода».

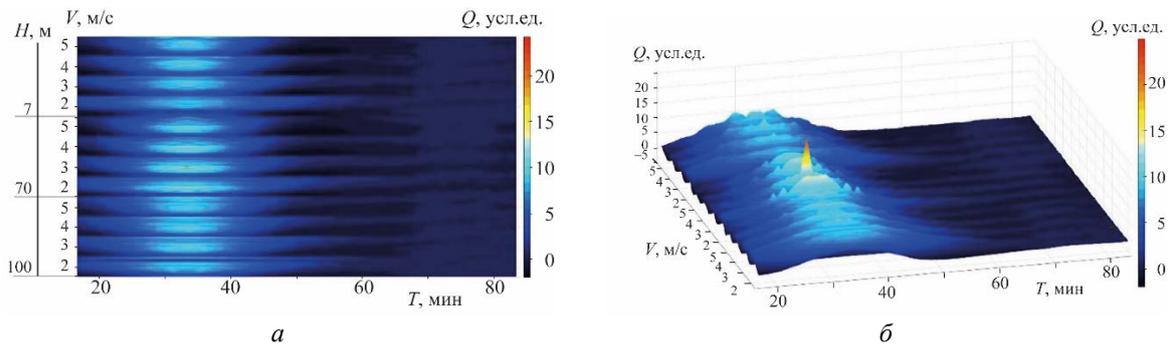


Рис. 3. Величины эффектов на выходе набора фильтров по глубине, скорости и кратчайшему расстоянию.

$a$  — вид сверху;  $b$  — изометрическая проекция.

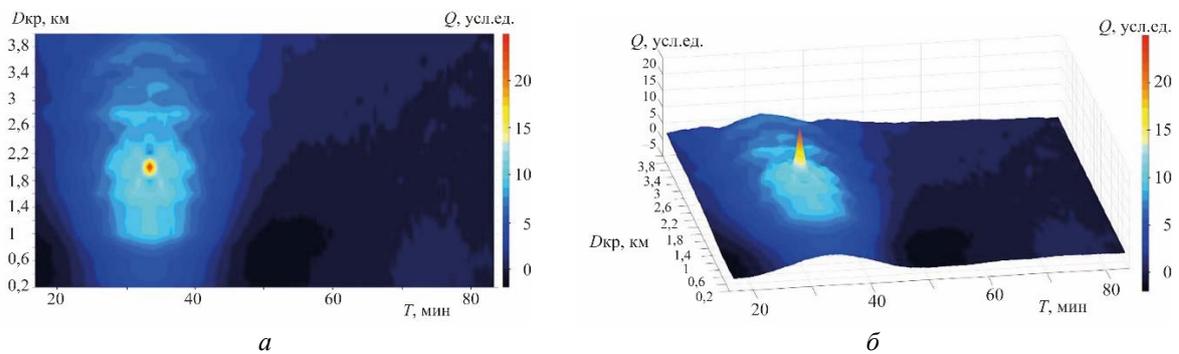


Рис. 4. Величины эффектов на выходе набора фильтров по кратчайшему расстоянию.

$a$  — вид сверху;  $b$  — изометрическая проекция.

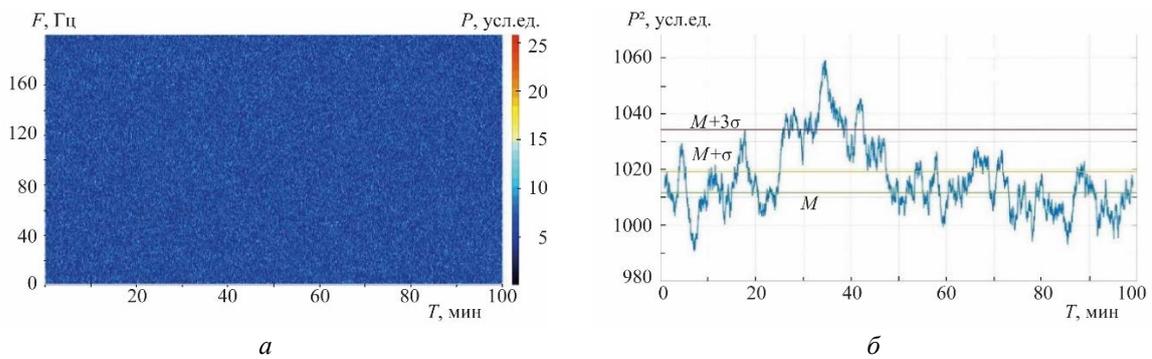


Рис. 5. Спектрограмма и «кривая прохода» источника шума при воздействии помехи давлением  $5P$ .

$a$  — спектрограмма;  $b$  — «кривая прохода».

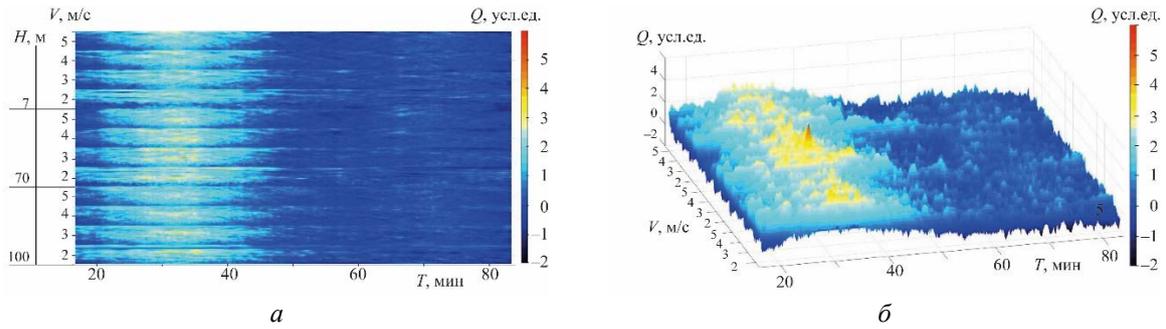


Рис. 6. Величины эффектов на выходе набора фильтров при воздействии помехи давлением 5Р.

*a* — вид сверху; *б* — изометрическая проекция.

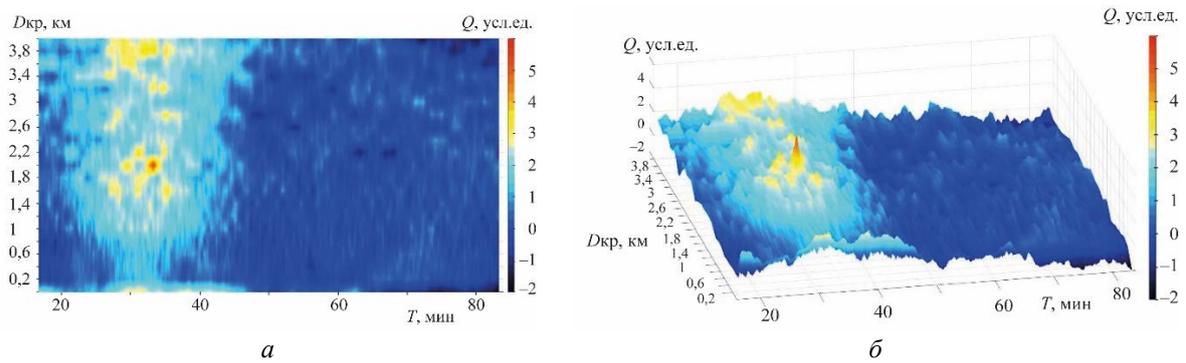


Рис. 7. Величины эффектов на выходе набора фильтров по кратчайшему расстоянию при воздействии помехи давлением 5Р.

*a* — вид сверху; *б* — изометрическая проекция.

Спектрограмма (рис. 5) уже не позволяет выявить на фоне шумовой помехи пространственно-временную интерференционную структуру шумового сигнала источника. «Кривая прохода» сильно зашумлена; факт прохода источника выявляется только благодаря тому, что шумовая помеха стационарна. Величины выходных эффектов для набора фильтров (рис. 6, 7) значительно зашумлены, однако позволяют безошибочно локализовать движущийся подводный источник. При воздействии шумовой помехи, давление которой в 7 раз больше первоначальной, метод не позволяет локализовать источник шума.

Таким образом разработанный метод локализации подводного источника широкополосного шума на основе его пространственно-скоростных портретов в частотной области позволяет осуществлять локализацию источника при воздействии помех такого уровня, при котором на спектрограмме источник уже не виден, а на «кривой прохода» наблюдается лишь при стационарной помехе.

#### Литература

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978.
2. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах / Изд. 2-е. М.: Наука, 1973.

Работа выполнена в рамках государственных заданий № FMWE-2021-0014 и № 075-00869-22-00.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ

*Н. А. Кутузов, А. В. Витальский, Д. А. Костеев, О. А. Потапов, Д. Д. Разумов, А. А. Родионов*, канд. физ.-мат. наук, *М. Б. Салин*, канд. физ.-мат. наук, *А. В. Стуленков*  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

## DETERMINATION OF SCATTERING CHARACTERISTICS OF LARGE-SCALE MODELS IN SHALLOW WATERS

*N. A. Kutuzov, A. V. Vitalsky, D. A. Kosteev, O. A. Potapov, D. D. Razumov, A. A. Rodionov*, Ph.D.,  
*M. B. Salin*, Ph.D., *A. V. Stulenkov*  
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

*Работа посвящена развитию методов определения уровня звука отраженного, от крупных объектов при проведении измерений в мелководных акваториях, когда реверберационная помеха сильно влияет на точность и, в принципе, на возможность проведения таких измерений. Предложен алгоритм, который позволяет оптимально фокусировать линейную антенну на рассеиватель, подавляя посторонние отражения. Дополнительно сравнивается эффективность применения простых и частотно-модулированных импульсов. Проведены испытания в диапазоне частот единиц килогерц на мелководной акватории глубиной 20 м.*

*The work is devoted to the development of methods for determining the level of sound reflected from large objects optimized for measurements in shallow water areas, when reverberation interference greatly affects the accuracy and, in general, the possibility of such measurements. An algorithm that allows optimal focusing of a linear antenna on a transducer, suppressing extraneous reflections is proposed. Additionally, the effectiveness of simple and frequency-modulated pulses is compared. Tests were carried out in the frequency range of several kilohertz in a 20 m deep shallow water area.*

**Введение.** Определение характеристик рассеяния объектов — актуальная задача гидроакустики. Существует ряд методов, применяющихся при численном моделировании для определения уровня отраженного сигнала [1–5]. Экспериментальное измерение характеристик рассеяния традиционно производится с помощью излучения коротких импульсных сигналов и селекции эхосигналов временным стробированием [5]. При проведении подобных измерений в низком диапазоне частот, возможности временного стробирования оказываются существенно ограничены, а коэффициент концентрации антенны — мал, и поэтому реверберационная помеха может сильно повлиять на точность (а иногда и возможность) определения уровня отраженного звука [6]. Оставляя «за скобками» другие способы подавления реверберационной помехи, такие как, например, доплеровская фильтрация [7], в настоящей работе авторы предлагают алгоритм, позволяющий оптимально фокусировать линейную антенну на рассеиватель, подавляя посторонние отражения. Алгоритм апробирован на экспериментальных данных с испытаний на полигоне с глубиной 20 м, когда исследовалась сила цели объекта длиной 6 м в диапазоне длин волн от 0,3 до 1 м. Т.е. указанные характерные размеры сопоставимы с глубиной места.

**Описание эксперимента.** Объектом исследования являлась модель — тело цилиндрической формы, основная часть — металлическая труба длиной около 5,5 м и диаметром 0,5 м. Экспериментальная установка включала поворотное устройство, позволяющее вращать погруженную в воду модель по или против часовой стрелки. Схема эксперимента приведена на рис. 1 (а — в вертикальной плоскости; б — вид сверху). Прием сигналов осуществлялся крестом из гидроакустических антенн (вертикальная и горизонтальная), каждая антенна содержит 32 пьезоакустических преобразователя (гидрофона). Расстояние между гидрофонами вертикальной антенны составляет 200 мм, общая длина вертикальной антенны 6,2 м (здесь обработка данных именно с этой антенны). Для подсветки модели использовался пьезокерамический излучатель типа «кольцо», излучатель размещен на расстоянии примерно 20 м от поворотного устройства. Крест из вертикальной и горизонтальной антенн размещен на расстоянии примерно 15 м от поворотного устройства (расстояние соответствует вертикальной антенне и центру горизонтальной). Глубины установки модели, излучателя и центра креста антенн составляли приблизительно 9 м. Над излучателем и моделью были установлены контрольные гидрофоны.

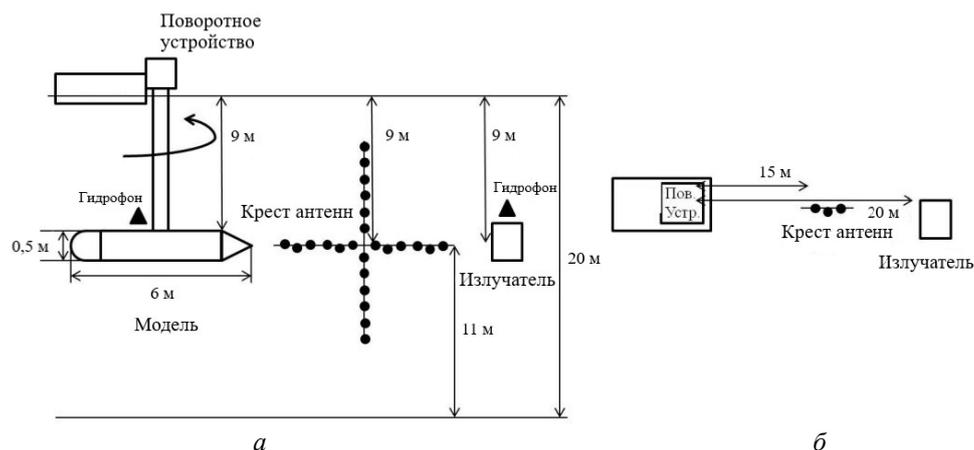


Рис. 1. Схема эксперимента.

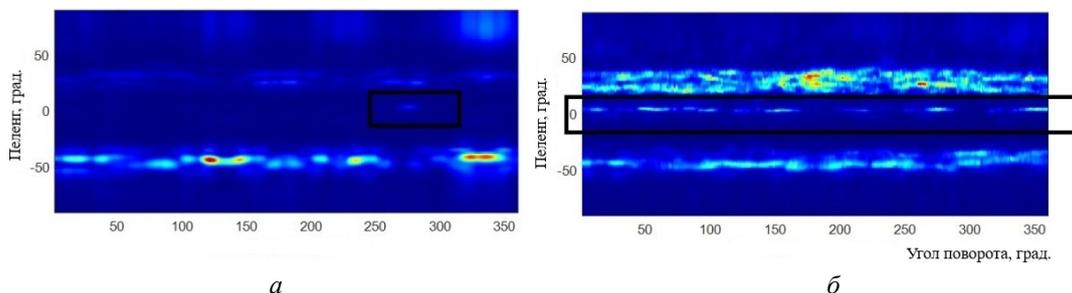


Рис. 2. Зависимость целевой функции от пеленга и угла поворота.

Рамка — отражение от модели; *а* — обычная фокусировка; *б* — фокусировка MUSIC.

В ходе эксперимента требовалось определить зависимость уровня отраженного от модели сигнала (*а* в конечном итоге силу цели) от угла поворота поворотного устройства. Полный поворот модели на 360 град. осуществлялся равномерно за 360 с. Предполагалось, что в момент «бортового» ракурса (поворот модели на 90 и 270 град.) уровень отраженного сигнала должен быть наибольший. Излучаемые сигналы представляли собой: в первой части эксперимента — короткие тональные импульсы, излучаемые раз в секунду (т.е. по одному импульсу для каждого угла поворота) с частотой заполнения в несколько килогерц и продолжительностью в несколько периодов; во второй части эксперимента — частотно-модулированные сигналы той же полосы.

**Алгоритм обработки экспериментальных данных.** Уже при обработке данных была выявлена особенность эксперимента — в процессе поворота модели из-за волнения менялось взаимное положение излучателя и антенной решетки. С помощью фокусировки [8] вертикальной антенны было произведена оценка положения излучателя. Отклонения излучателя составляют десятки сантиметров, что достаточно много для соответствующей импульсу длине волны (0,5 м для 3000 Гц).

Изучение сигнала с гидрофонов показало, что сигнал представляет собой некоторую случайную интерференционную структуру (рис. 3, *а*). Судя по задержкам, могли предположительно интерферировать двукратно отраженные импульсы, т.е. импульсы излучатель–поверхность–дно–приемная антенна и излучатель–дно–поверхность–приемная антенна. Изменчивость интерференционной структуры связана с относительным дрейфом излучателя и приемной системы. В данных условиях для обнаружения модельного отражения был применен метод MUSIC [9]. Корреляционная матрица принятого сигнала усреднялась по 10 углам поворота, параметр метода (который должен быть больше числа источников) взят равным 8, чтобы отстроиться от всех возможных помех. На рис. 2 приведен результат обработки. Отметим, что четкость обнаружения модели с помощью обычной фокусировки в сравнении с MUSIC значительно снижена, модель видно только в моменты «бортового» ракурса.

На рис. 3, б показана зависимость сфокусированного сигнала от времени (относительной задержки) и угла поворота модели. Представлен сигнал после временной синхронизации (уточнено время прихода импульса от модели) и обработки данных MUSIC. Временная синхронизация производилась путем построения взаимной корреляционной функции (ВКФ) сигналов для соседних углов поворота с последующим смещением сигналов в соответствии положением максимума ВКФ (определенного временного сдвига). На рис. 3, б показаны также границы импульсов для модели отражения от точек на краю модели. То есть максимуму в районе 90 и 270 град. поставлены в соответствие ракурсы, при которых задержка от ближайшей части модели является максимальной. При локации вдоль длинной стороны задержка от ближайшей к приемной системе части модели (задней или передней) является минимальной.

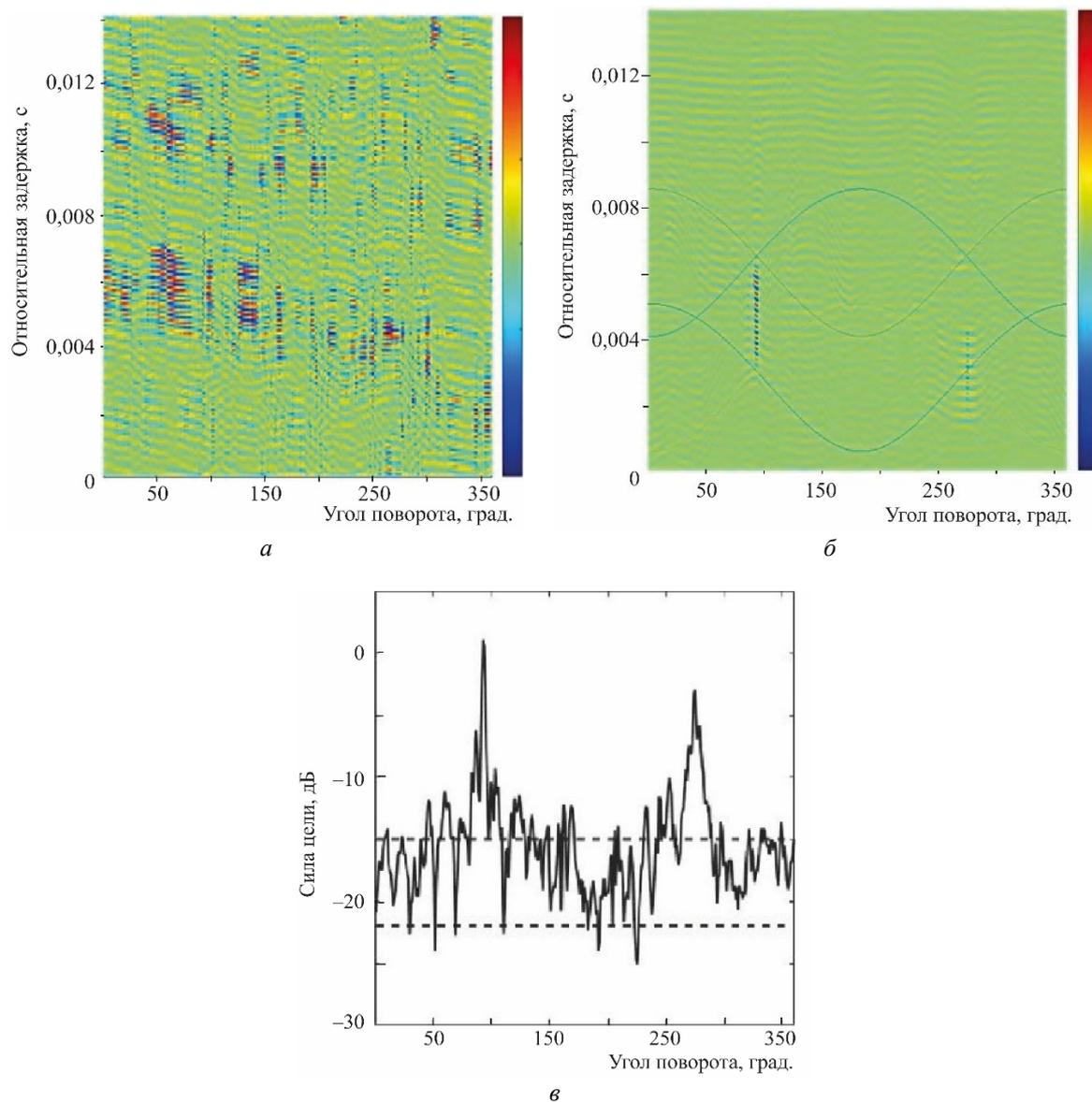


Рис. 3.

*а* — зависимость сигнала с одиночного гидрофона от времени (относительной задержки) и угла поворота модели;  
*б* — зависимость сфокусированного сигнала от времени (относительной задержки) и угла поворота модели после синхронизации, показаны также границы импульсов для модели отражения от блестящих точек на краю модели;  
*в* — сплошной линией показана зависимость силы цели в дБ от угла поворота (шкала условная);  
 пунктиром — средний и максимальный уровни фона (отклик, полученный по записи без модели).

Интересующая нас величина — сила цели определяется как отношение мощности рассеянного сигнала в 1 м от цели к мощности сигнала подсветки на цели. Для определения этого параметра по прямому лучу подсветки и прямому эхо-сигналу необходимо знать расстояние от центра измерительной системы до цели  $r_{0m}$ , расстояние от излучателя до центра антенны  $r_{0e}$ , а также расстояние от излучателя до цели  $r_{em}$ . В этом случае сила цели записывается следующим образом:

$$СЦ = 20lg \frac{pr_{0m}r_{em}}{p_0r_{0e}}, \quad (1)$$

где  $p$  — средняя амплитуда рассеянного сигнала на приемной системе,  $p_0$  — средняя амплитуда прямого сигнала от излучателя на приемной системе.

На рис. 3, в — представлена зависимость оценки силы цели от ракурса, построенная по сигналу, приведенному на рис. 3, б. Шкала в дБ условная. Пунктирными линиями представлены средний и максимальный уровни фона (отклика, полученного по записи без модели). Полученная зависимость имеет физический смысл, а обсуждение ее особенностей выходит за рамки данной работы.

#### Сравнение эффективности простых и частотно-модулированных импульсов.

В дополнение к описанному выше эксперименту было проведено сравнение эффективности применения простых и частотно-модулированных сигналов в тех же условиях. Сравнивались 4 типа импульсный сигналов с близкими центральными частотами:  $a$  — сигнал без перестройки частоты «ton 2250» (частота  $f_{ц} = 2250$  Гц, длительность  $t = 3$  мс);  $b$  — короткий сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и быстрой перестройкой — «lfm 2025» (перестройка частоты 2025–2475 Гц,  $t = 3$  мс);  $в$  — длинный ЛЧМ-сигнал с «быстрой» перестройкой — lfm 1500 (перестройка частоты 1500-3000 Гц,  $t = 10$  мс);  $г$  — длинный ЛЧМ-сигнал с «медленной» перестройкой — «lfm 2025» (перестройка частоты 2025–2475 Гц,  $t = 3$  мс). Период следования всех импульсов был одинаковым и равным 1 с.

Метод обработки сигналов — фазирование, корреляция с опорным и вычисление огибающей (в случае простого импульса это соответствует фильтрации с оптимальной полосой). На рис. 4. представлены результаты обработки принимаемых сигналов. Оси X соответствует «время» каждого импульса, оси Y — угол поворота объекта, цветом обозначены уровни, выраженные в дБ (по сравнению с рис. 3 — транспонировано). Белым выделены области, в которых ожидается прием траверсного блика. Красная область (постоянная засветка) вблизи нуля — прямой сигнал.

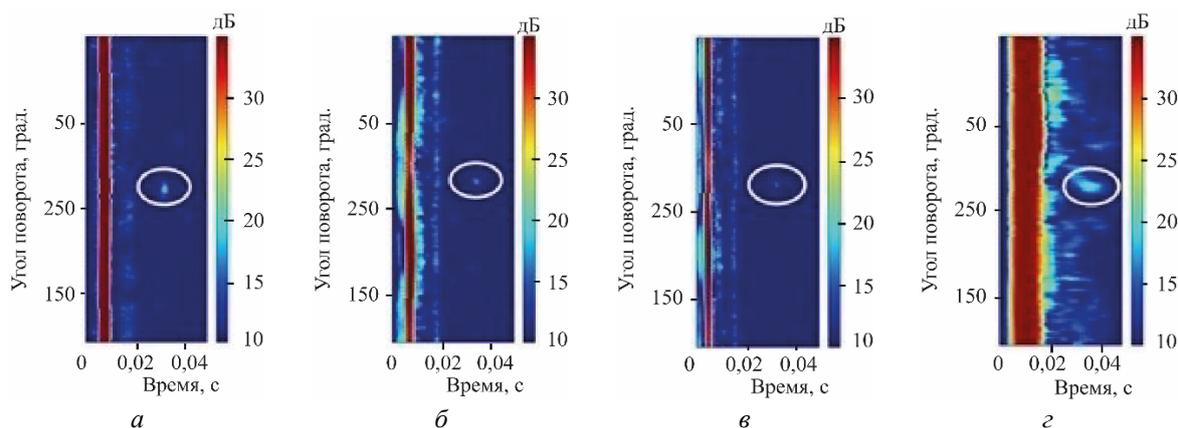


Рис. 4. Уровни отраженных сигналов.

$a$  — ton 2250, 3 мс;  $b$  — lfm 2025, 3 мс;  $в$  — lfm 1500, 10 мс;  $г$  — lfm 2100, 10 мс.

В данном случае, среди рассмотренных примеров, наиболее эффективными для задач локации оказался сигнал без модуляции (тон 2250). Данное сравнение позволяет сделать вывод об отсутствии ощутимых преимуществ в применении ЛЧМ-сигналов относительно импульсных сигналов без модуляции в данных условиях. Некоторое практическое преимущество может быть достигнуто при излучении сигнала в очень широкой полосе и последующей обработкой по поддиапазонам — таким образом сокращается время испытаний. Следует ожидать, что эффективность использования ЛЧМ-сигналов будет значительной в тех задачах, где ограничивающим фактором является шум моря, а не реверберация

**Выводы.** Предложенный алгоритм, основанный на фокусировке с синхронизацией и уточнением времени прихода отраженного сигнала от цели по методу MUSIC позволил оптимально сфокусировать линейную антенну на рассеиватель, подавляя посторонние отражения. Исследование характеристик рассеяния крупномасштабных моделей в мелководной акватории, а именно на полигоне с глубиной 20 м при работе в диапазоне частот единиц килогерц, не соответствует каким либо типовым методика, но при этом является новой и востребованной задачей. Проведено сравнение эффективности ЛЧМ и импульсных сигналов.

#### *Литература*

1. Waterman P. C. T-matrix methods in acoustic scattering // J. Acoust. Soc. Am. 2009. Vol. 125. P. 42–51.
2. Wilkes D., Duncan A., Marburg S. A parallel and broadband Helmholtz FMBEM model for large-scale target strength modeling // J. of Theoretical and Computational Acoustics. 2020. Vol. 28, № 3.
3. Салин М. Б., Соков Е. М., Суворов А. С. Расчет бистатической силы цели сложных многорезонансных оболочек методом конечных элементов // Акуст. жур. 2011. Т. 57, № 5. С. 709–716.
4. Sarkissian A. Method of superposition applied to scattering from a target in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 1994. Vol. 95, № 5. P. 2340–2345.
5. Ионов А. В., Майоров В. С. Гидролокационные характеристики подводных объектов. СПб.: ЦНИИ им. А. Н. Крылова, 2011. 325 с.
6. Ting Zhang, Yang T. C., Wen Xu Channel distortion on target scattering amplitude in shallow water // J. Acoust. Soc. Am. 2019. Vol. 146. E L470.
7. Салин Б. М., Кемарская О. Н., Салин М. Б. «Ближнепольное» измерение характеристик рассеяния движущегося объекта, основанное на доплеровской фильтрации сигнала // Акуст. жур. 2010. Т. 56, № 6. С. 802–812.
8. Турчин В. И. Введение в современную теорию оценки параметров сигналов // Н. Новгород: ИПФ РАН, 2005. 116 с.
9. Krim H., Viberg M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach // IEEE Signal Processing Magazine. 1996. Vol. 13, № 4. P. 67–94.

Работа выполнена в рамках госзадания №0030-2021-0017.

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В МЕЛКОМ МОРЕ

*В. Н. Кравченко, канд. техн. наук, Ю. В. Махнев*

АО «Научно-исследовательский институт «Атолл», Дубна, Россия

## ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF SEVERAL ALGORITHMS FOR DETECTING OF LOW-FREQUENCY HYDROACOUSTIC SIGNALS IN SHALLOW SEA

*V. N. Kravchenko, Ph.D., Y. V. Makhnev*

JSC «Scientific and Research Institute «Atoll», Dubna, Russia

*С использованием статистического моделирования получены оценки эффективности различных алгоритмов обнаружения низкочастотных гидроакустических сигналов для шумопеленгационной системы, функционирующей в мелком море, характеризующегося многомодовым распространением сигналов. Рассматривается зависимость отношения сигнал/шум от используемых алгоритмов обработки сигналов, отличающихся степенью согласования со средой распространения и вычислительными затратами.*

*Using statistical modeling, estimates of the efficiency of several algorithms for detecting low-frequency hydroacoustic signals in a noise direction finding system, functioning in a shallow sea characterized by multimode propagation of signals, were obtained. The dependence of the signal-to-noise ratio on the signal processing algorithms used, differing in the degree of agreement with the waveguide and computational costs, was considered.*

Эффективность алгоритмов обнаружения сигналов, регистрируемых гидроакустической системой (ГАС), работающей в режиме шумопеленгования, определяется получаемым отношением сигнал/шум (с/ш) на выходе тракта пространственной обработки. Величина с/ш зависит от используемого алгоритма обработки сигналов и степени согласования модели ожидаемого сигнала с принимаемым. Рассмотрим модель принимаемого на линейную антенну сигнала в низкочастотном диапазоне во многомодовом волноводе от точечного источника, излучающего белый шум. Принимаемый на частоте  $\omega$  сигнал  $P$  является случайным волновым процессом, который можно описать следующим образом

$$P(n, \omega, a, b) = a \cdot \xi(n, \omega) + b \cdot \sum_{m=1}^{M(\omega)} \frac{10^{-10^{-4} \cdot \beta(m, \omega) \cdot d(n)}}{r_0 \cdot d(n)} \cdot \tilde{A}(m, \omega) \cdot e^{1j \left( \frac{\omega \cdot d(n)}{c(m, \omega)} + \tilde{\varphi}(m, \omega) \right)}; \quad (1)$$

$$d(n) = \sqrt{(R_0 \cdot \cos(\theta) - x(n))^2 + (R_0 \cdot \sin(\theta) - y(n))^2},$$

где  $P$  — случайный волновой процесс (случайное поле давлений) на антенне, оценённый на некотором интервале времени, в пределах которого принимаемый процесс можно считать стационарным;  $n = 1, 2, \dots, N$  номера приёмников антенны, где  $N$  — количество приёмников;  $a, b$  — переключатели, принимают значение 0 или 1;  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  частота сигнала, Гц;  $\xi(n, \omega)$  — реализация белого шума;  $\beta(m, \omega)$  — частотно-зависимое пространственное затухание, дБ/км;  $m$  — номер моды;  $d(n)$  — расстояние от источника сигнала до  $n$ -го приёмника, м;  $r_0$  — переходное расстояние от сферического к цилиндрическому, м;  $M(\omega)$  — количество распространяющихся энергосзначимых мод;  $\tilde{A}$  — случайная амплитуда  $m$ -ой моды, включающая интенсивность излучения источника и коэффициент возбуждения моды;  $1j$  — мнимая единица;  $c(m, \omega)$  — частотно-зависимая фазовая скорость мод, м/с;  $\tilde{\varphi}(m, \omega)$  — случайная начальная фаза мод, рад;  $R_0$  — расстояние от фазового центра антенны до источника сигнала, м;  $\theta$  — направление на источник сигнала, град ( $0^\circ$  соответствует направлению бегущей волны);  $x(n)$  и  $y(n)$  координаты приёмников антенны, м.

В данной работе в рамках статистического моделирования будет рассмотрено решение классической задачи обнаружения сигнала на некоторой частоте  $\omega$ , которое подразумевает получение ответа «да» или «нет» на вопрос «присутствует ли сигнал во входной выборке данных

$P(n, \omega, a, b)$ ?» при известной форме принимаемого сигнала, всегда точно известных значениях параметров  $R_0, \theta, c, \beta, d, r_0, x, y$  и отсутствии других источников сигнала.

Задача обнаружения решается при размещении источника сигнала на разном удалении  $R_0$  и под разными углами  $\theta \in [0, 90]$  относительно антенны, что позволит оценить выигрыш в с/ш в зависимости от дальности действия ГАС. Дальность действия ГАС будем определять по вероятности правильного обнаружения (ВПО) сигнала при фиксированном значении ложной тревоги (ЛТ). Максимальной дальностью действия ГАС будем считать то значение, при котором обеспечивается ВПО на уровне 0,9. Значения ВПО и ЛТ получаем в результате вычисления интеграла вероятности по оценённым плотностям распределения вероятностей (ПРВ). Оценку ПРВ шума и ПРВ сигнала в шуме получаем по гистограмме значений, получаемых на выходе приёмника (обозначаемого далее  $Y$ ), при подаче на вход только шума  $P(n, \omega, 1, 0)$  и сигнала плюс шум  $P(n, \omega, 1, 1)$  соответственно. Массив значений для построения гистограмм получаем в результате статистического моделирования реализаций шумов  $\xi(n, \omega)$  и сигнала  $P(n, \omega, 0, 1)$  и их дальнейшей пространственной обработки различными алгоритмами. Объём статистики: 2000 реализаций белого шума на каждую из 250 реализаций сигнала (всего  $10^5$ ) в каждой точке расположения источника сигнала относительно антенны. При моделировании значения  $\tilde{A}(m, \omega) \in [0, 1]$  и  $\tilde{\varphi}(m, \omega) \in [0, 2\pi]$  распределены равномерно, количество мод в сигнале  $M = 4$ , затухание  $\beta$  одинаково для всех мод, а пространственные частоты мод  $p(m) = \frac{|\cos(\theta)| \cdot \omega}{2\pi \cdot c(m, \omega)}$  при  $\omega = 0,27 \cdot 2\pi \cdot f_0$ , где  $f_0 = \frac{1500}{2 \cdot d}$  — проектная частота антенны;  $d$  — расстояние между приёмниками;  $\theta = 0$  равны  $p = \{0,0131; 0,0124; 0,0115; 0,0107\}$ ; длина антенны  $L = 13,4 \cdot f_0$ , м. Моделирование проводилось на персональном компьютере с помощью программного обеспечения MATLAB 2014b.

Рассмотрим те алгоритмы, которые использовались при моделировании. Оптимальная пространственная обработка сигналов, более известная как Matched-Field Processing (полностью согласованная и когерентная), реализуется следующим образом

$$Y_{\text{опт}}(\omega, b) = \text{Re} \left( \sum_n (P(n, \omega, 0, 1))' \cdot P(n, \omega, 1, b) \right),$$

где  $Y_{\text{опт}}$  — значение на выходе оптимального приёмника сигнала;  $\text{Re}$  — реальная часть;  $'$  — комплексное сопряжение;  $b$  — принимает значение 0 или 1 в зависимости от того какая ПРВ оценивается.

Рассмотрение (2) позволяет оценить максимально возможное значение с/ш. Использование (2) подразумевает знание случайных значений параметров  $\tilde{A}$  и  $\tilde{\varphi}$  в (1), что обеспечивается при моделировании. На практике необходимо перебирать все возможные сочетания этих параметров, что является сложно реализуемым в вычислительном плане за приемлемое время. В связи с этим используют менее требовательные к вычислениям квазиоптимальные алгоритмы, обеспечивающие некогерентное накопление энергии мод.

$$Y_H(\omega, b, N_m, A_m, c_m) = \sum_{m=1}^{N_m} A(m) \cdot \left| \sum_n e^{1j \frac{\omega \cdot d(n)}{c_m(m)}} \cdot P(n, \omega, 1, b) \right|^2, \quad (3)$$

где  $Y_H$  — значение на выходе квазиоптимального приёмника;  $N_m, A_m, c_m$  — соответственно количество мод, их относительные амплитуды и фазовые скорости, используемые при обработке. При моделировании используются следующие варианты параметров для алгоритма (3):

$$Y_1 = Y_H(\omega, b, 1, \{1\}, \{c(1, \omega)\});$$

$$Y_2 = Y_H(\omega, b, 2, \{1, 1\}, \{c(1, \omega), c(2, \omega)\});$$

$$Y_3 = Y_H(\omega, b, 3, \{1, 1, 1\}, \{c(1, \omega), c(2, \omega), c(3, \omega)\});$$

$$Y_4 = Y_H(\omega, b, 3, \{1, 1, 1, 1\}, \{c(1, \omega), c(2, \omega), c(3, \omega), c(4, \omega)\});$$

$$Y_c = Y_H(\omega, b, 1, \{1\}, \{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M c(m, \omega)\}).$$

Такие алгоритмы предлагалось использовать в [1, 2]. Наиболее согласованным с принимаемым сигналом является вариант  $Y_4$ , а остальные алгоритмы интересны в плане получения оценок выходного с/ш при пространственной обработке с частичным рассогласованием / сокращением вычислительных затрат.

Нами предлагается использовать асимптотически оптимальные алгоритмы, построенные на знании того, что принимаемый сигнал является случайным процессом, который описывается корреляционной матрицей

$$R_s(i, j, \omega) = \frac{1}{M(\omega)} \sum_{m=1}^{M(\omega)} \left( e^{-\frac{f_0 \cdot 0,69 \cdot k_c(m, \omega)}{f \cdot L} |d(i) - d(j)|} \cdot e^{1j \frac{\omega \cdot (d(i) - d(j))}{c(m, \omega)}} \right), \quad (4)$$

где  $R_s$  — корреляционная матрица ожидаемого сигнала;  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ; значение 0,69 подобрано по результатам моделирования и ещё нуждается в уточнении;  $k_c(m, \omega)$  — коэффициент расширения пространственного спектра из-за межмодового взаимодействия [3]

$$k_c(m, \omega) = \begin{cases} -4 \cdot \left( \frac{cc(m, \omega)^2}{(M(\omega) - 1)^2} - \frac{cc(m, \omega)}{M(\omega) - 1} \right), & \text{при } M(\omega) > 1; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$cc(m, \omega) = \sum_{i=1}^{M(\omega)} (|\Delta p(m, i)|) - 1,$$

где  $cc$  — коэффициент, показывающий степень перекрытия основного лепестка характеристики направленности на  $m$ -ую моду с основными лепестками остальных мод;

$$\Delta p(m, i) = \frac{H(i, \omega)^+ \cdot H(m, \omega)}{\sqrt{H(i, \omega)^+ \cdot H(i, \omega) \cdot H(m, \omega)^+ \cdot H(m, \omega)}}, \quad H(m, \omega) = \left[ e^{1j \frac{\omega \cdot d(1)}{c(m, \omega)}}, e^{1j \frac{\omega \cdot d(2)}{c(m, \omega)}}, \dots, e^{1j \frac{\omega \cdot d(N)}{c(m, \omega)}} \right]^T$$

— вектор-столбец, описывающий принимаемую на антенну  $m$ -ую моду на частоте  $\omega$ ;  $+$  — эрмитово сопряжение;  $T$  — операция транспонирования. Коэффициент  $k_c(m, \omega)$  близок к нулю в случаях, если основной лепесток  $m$ -ой моды не перекрывается или наоборот очень сильно перекрывается со всеми основными лепестками других мод. Коэффициент  $k_c$  равен единице, когда сумма перекрытий с другими модами  $cc(m, \omega)$  равна  $(M(\omega) - 1)/2$ .

Оптимальный алгоритм обнаружения  $Y_a$  случайного сигнала, описываемого (4), можно записать следующим образом

$$Y_a(\omega, b, N_\lambda) = \sum_{l=1}^{N_\lambda} \lambda(l) \cdot |\sum_n \psi(l) \cdot P(n, \omega, 1, b)|^2, \quad (5)$$

где  $N_\lambda$  — количество используемых собственных значений  $\lambda$  и собственных функций  $\psi$  матрицы  $R_s$  при обработке. При моделировании используются следующие асимптотически оптимальные приближения к алгоритму (5), выражающиеся в использовании ограниченного числа собственных функций:  $Y_{сф1} = Y_a(\omega, b, 1)$ ;  $Y_{сф2} = Y_a(\omega, b, 2)$ ;  $Y_{сф3} = Y_a(\omega, b, 3)$ ;  $Y_{сф4} = Y_a(\omega, b, 4)$ . Таким образом, вычислительная сложность алгоритмов  $(Y_1, Y_c, Y_{сф1})$ ,  $(Y_2, Y_{сф2})$ ,  $(Y_3, Y_{сф3})$  и  $(Y_4, Y_{сф4})$  одинакова внутри каждой группы.

Получим оценки дальности действия ГАС и на их основе рассчитаем значения с/ш, получаемые различными алгоритмами.

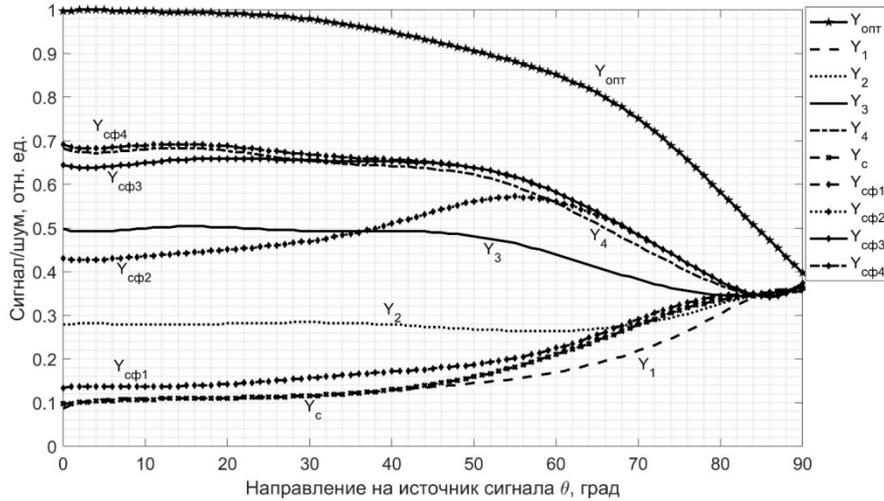


Рис. 1. Оценки с/ш, выраженные относительно оптимального алгоритма обработки  $Y_{\text{опт}}$  (ось ординат) в зависимости от использованного алгоритма и направления на источник сигнала  $\theta$ .

На рис. 1 видно, что с/ш зависит от направления на источник сигнала. Чем ближе направление на источник к нормали антенны ( $90^\circ$ ), тем меньше потенциальное ( $Y_{\text{опт}}$ ) значение с/ш. Это объясняется тем, что поле давлений на антенне с приближением к нормали становится всё более однородным по приёмникам, и при  $\theta = 90^\circ$  (в дальней зоне антенны) поле давлений на приёмниках практически одинаковое. По сути, на каждой реализации мы наблюдаем на антенне одно единственное мгновенное значение случайного процесса (1), в связи с чем возникновение интерференционного минимума, охватывающего всю антенну, становится более вероятным, что приводит к резкому снижению интенсивности сигнала на антенне и уменьшению с/ш. Напротив, алгоритмы ( $Y_1, Y_c, Y_{\text{сф1}}, Y_2$ ) увеличивают с/ш при приближении к  $90^\circ$ , что связано с пространственным разрешением мод. Эта группа алгоритмов, в данном случае, наименее согласована с принимаемым сигналом (по 1–2 модам из 4-х). Чем дальше направление наблюдения от направления бегущей волны антенны, тем меньшей разрешающей способностью по пространственным частотам обладает антенна и тем более «согласованными» с сигналом становятся алгоритмы в этой группе. Ещё одним интересным фактом является то, что в диапазоне направлений от  $84^\circ$  до  $90^\circ$  все алгоритмы, кроме оптимального, обеспечивают одинаковое с/ш, т.к. соотношение заложенных в модели фазовых скоростей мод, рабочей частоты и длины антенны не позволяет сколько-нибудь существенно разрешить моды в этих направлениях.

Сравнивая с/ш, обеспечиваемый разными алгоритмами, можно утверждать, что алгоритм (5) во всех случаях обеспечивает выигрыш в с/ш относительно (3) при тех же вычислительных затратах. Посчитаем выигрыш в с/ш за счёт использования алгоритма (5) относительно алгоритмов с теми же вычислительными затратами и занесём результат в табл. 1.

Таблица 1

Выигрыш в отношении сигнал/шум относительно алгоритма  $Y_N$  при использовании алгоритма  $Y_{\text{сф}}$

|                                                               |                      | Направление на источник сигнала $\theta$ , град |    |    |    |     |    |    |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|----|----|----|-----|----|----|
|                                                               |                      | 0                                               | 15 | 30 | 45 | 60  | 75 | 90 |
| Выигрыш в с/ш при использовании алгоритма $Y_{\text{сф}}$ , % | $Y_{\text{сф1}}/Y_1$ | 55                                              | 27 | 36 | 31 | 33  | 27 | 0  |
|                                                               | $Y_{\text{сф1}}/Y_c$ | 36                                              | 27 | 36 | 25 | 7   | 4  | 0  |
|                                                               | $Y_{\text{сф2}}/Y_2$ | 54                                              | 59 | 65 | 97 | 112 | 44 | 0  |
|                                                               | $Y_{\text{сф3}}/Y_3$ | 29                                              | 30 | 33 | 33 | 33  | 20 | 0  |
|                                                               | $Y_{\text{сф4}}/Y_4$ | 1                                               | 1  | 2  | 2  | 4   | 5  | 0  |

Из табл. 1 видно, что алгоритмы ( $Y_{сф1}$ ,  $Y_{сф2}$ ,  $Y_{сф3}$ ) дают существенный прирост (в среднем на 40 %) в с/ш относительно квазиоптимальных аналогов ( $Y_1, Y_с, Y_2, Y_3$ ). Наибольшее с/ш обеспечивает алгоритм  $Y_{сф4}$  (рис. 1), который на 1–5 % превосходит  $Y_4$ .

Полученные результаты являются лишь частным случаем заданных в модели соотношений между длиной антенны, рабочей частотой, количеством мод и их фазовыми скоростями. Выигрыш от использования  $Y_{сф}$  в сравнении с  $Y_N$  необходимо рассчитывать для конкретной конфигурации ГАС, количества распространяющихся мод и их параметров. Например, при  $\sum_m k_c(m) \approx 0$  алгоритмы  $Y_{сф}$  и  $Y_N$  будут тождественны. Напротив, при  $\sum_m k_c(m) \approx 1$  стоит ожидать наибольшего увеличения с/ш за счёт использования  $Y_{сф}$ .

В дальнейшей работе предстоит оценить с/ш при других распределениях случайных амплитуд и начальных фаз мод, при разных коэффициентах затухания мод, получить аналитические выражения для оценки с/ш на выходе тракта пространственной обработки при использовании модели принимаемого сигнала в виде случайного волнового процесса.

### *Литература*

1. Елисеев В. А. Усредненный отклик горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акуст. жур. 2004. Т. 50, № 2. С. 193–197.
2. Кузнецов Г. Н. Лебедев О. В. О возможности применения модели с эквивалентной плоской волной для повышения точности пеленгования низкочастотных сигналов в мелком море // Акуст. жур. 2012. Т. 58, № 5. С. 628–638.
3. Махнев Ю. В. Моделирование и анализ точности алгоритмов шумопеленгации источников низкочастотных гидроакустических сигналов в мелком море // Вест. ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2019. № 4. С. 72–84.

## ОЦЕНКА ФАЗОВЫХ СКОРОСТЕЙ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН В МЕЛКОМ МОРЕ ПО ШУМАМ СУДОХОДСТВА С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Ю. В. Махнев

АО «Научно-исследовательский институт «Атолл», Дубна, Россия

## ESTIMATION OF THE PHASE VELOCITIES OF NORMAL WAVES IN A SHALLOW SEA FROM THE NOISE OF SHIPPING USING A LINEAR PHASED ARRAY ANTENNA

Y. V. Makhnev

JSC «Scientific and Research Institute «Atoll», Dubna, Russia

*Предложен способ получения оценок фазовых скоростей нормальных волн по шуму, излучаемому рыболовными, транспортными и пассажирскими судами. Обоснована необходимость использования линейной фазированной антенной решетки. Показано, что для получения оценок фазовых скоростей необходимо знать, либо оценивать координаты судна. Использован шум на частотах, соответствующих дискретным составляющим в спектре шума от судов, что обеспечивает большое значение с/ш. Данный способ апробирован на экспериментальных данных. Проведено сравнение оценок фазовых скоростей, полученных по предложенному и импульсному методам.*

*A method for obtaining estimates of the phase velocities of normal waves from the noise emitted by fishing, transport and passenger ships was proposed. The necessity of using a linear phased array antenna was proved. Necessity of knowledge of the ship's coordinates to obtain estimates of phase velocities was shown. Noise at frequencies corresponding to discrete components in the spectrum of noise from ships was used, which provides a high value of signal to noise ratio. This method has been tested on experimental data. Estimates of phased velocities obtained by the proposed and the pulse methods were compared.*

**Введение.** Дисперсионные кривые мод (нормальных волн) характеризуют сигналы, принимаемые гидроакустической системой (ГАС), и используются в алгоритмах пространственной обработки, в акустической томографии, при построении моделей волновода и при решении множества других задач. Дисперсионные кривые показывают зависимость фазовых скоростей мод от частоты. Фазовые скорости мод (ФСМ) могут очень сильно отличаться в зависимости от района установки ГАС, погодных условий, глубины волновода и других параметров. Обычно, для оценки ФСМ используются импульсные или интерференционные методы. В этих методах используются мощные излучатели, например, в импульсном это взрывные заряды или пневматическая пушка, а в интерференционном это дорогостоящий полигармонический излучатель, работающий в широкой полосе частот. Импульсный метод оценивания ФСМ применим только при расстояниях до приёмника больше критического [1]. Интерференционный метод, наоборот, применим на малых расстояниях, но требует множество приёмников или использования методов синтеза апертуры. Обычно для проведения работ необходимо иметь судно с излучателем и другим специальным оборудованием на борту. Судно должно быть оборудовано системой GPS или ГЛОНАСС, и должно в ходе работ многократно пройти через район установки ГАС, периодически излучая мощный гидроакустический сигнал.

В связи с вышесказанным особый интерес представляет поиск более дешевых способов оценки дисперсионных кривых мод, причём лишенных указанных недостатков. Очевидно, что если использовать в качестве источника сигналов, по которым оцениваются ФСМ, шум проходящих судов, то отпадают все затраты, связанные с приобретением излучателей и их буксировкой. Шумы судоходства являются сигналами непрерывного типа, следовательно, оценка ФСМ в этом случае возможна только интерференционным методом. Рыболовные, транспортные и пассажирские суда двигаются относительно ГАС хаотично, что не позволяет синтезировать апертуру антенны по их шумам. Отсюда следует, что достаточно большая апертура должна быть заранее физически реализована в виде донной фазированной антенной решетки (ФАР).

**Теоретическая часть.** Известно, что отклик линейной ФАР на сигнал в многомодовом волноводе, как функция угла компенсации ФАР, имеет ряд максимумов, определяемых ФСМ разных номеров [2]. Очевидно, что при известном направлении на источник сигнала относительно ФАР, можно оценить ФСМ. Решение этой задачи было рассмотрено в [3]. Показано, что разрешающая способность ФАР при выделении мод определяется её апертурой и направлением на источник сигнала. В случае прихода сигнала по нормали к ФАР моды не разрешаются и ФСМ оценить нельзя. Максимальная разрешающая способность имеет место при работе антенны в режиме бегущей волны.

В низкочастотной гидроакустике [4] для однозначного разрешения мод соседних номеров интерференционным методом требуется ФАР с очень большой апертурой (порядка 10 км), на изготовление и постановку которой уйдёт гораздо больше средств, чем на проведение специальных работ с буксировкой излучателя. Однако, вышесказанное не означает, что с помощью ФАР с недостаточной для разрешения мод апертурой нельзя получить полезную информацию о ФСМ. При определённых соотношениях длины апертуры линейной ФАР и длины нормальных волн можно наблюдать «квазиразрешение» мод, т.е. наблюдать биения [5] между модами в отклике антенны. Наблюдая за характером биений по динамике откликов ФАР в направлении на судно, можно сделать выводы о том, каков диапазон возможных значений ФСМ, входящих в принятый сигнал.

Динамику откликов ФАР для направления на источник сигнала [3] в разные, следующие друг за другом моменты времени, при разных возможных значениях ФСМ, можно рассчитать согласно выражению

$$D(t, c, f) = |H(t, c, f) \cdot P(t) \cdot \mathcal{F}(f)^T|^2; \quad (1)$$

$$H(t, c, f) = [e^{j \frac{2\pi f}{c} x(0) \cdot \cos(\theta(t))}, e^{j \frac{2\pi f}{c} x(1) \cdot \cos(\theta(t))}, \dots, e^{j \frac{2\pi f}{c} x(N_g-1) \cdot \cos(\theta(t))}];$$

$$P(t) = \begin{bmatrix} p_{0,t+0 \cdot \Delta t} & \dots & p_{0,t+(N-1) \cdot \Delta t} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{(N_g-1),t+0 \cdot \Delta t} & \dots & p_{(N_g-1),t+(N-1) \cdot \Delta t} \end{bmatrix};$$

$$\mathcal{F}(f) = [1, e^{-j \cdot 2\pi f \cdot 1 \cdot \Delta t}, e^{-j \cdot 2\pi f \cdot 2 \cdot \Delta t}, \dots, e^{-j \cdot 2\pi f \cdot (N-1) \cdot \Delta t}],$$

где  $D(t, c, f)$  — динамика откликов антенны на шум от судна в момент времени  $t$ , при фазовой скорости  $c$  м/с, на частоте  $f$  Гц;  $H(t, c, f)$  — направляющий вектор при приходе сигнала с направления на судно  $\theta(t)$  в момент времени  $t$ ;  $x$  — координаты приёмников линейной ФАР;  $N_g$  — количество приёмников в ФАР; знак  $\cdot$  обозначает скалярное умножение;  $P(t)$  — матрица пространственно-временных значений поля давлений  $p_{n,\tau}$ , получаемых с приёмников ФАР с номерами  $n = 0, 1, \dots, N_g - 1$  в  $\tau = t + (0, 1, \dots, N - 1) \cdot \Delta t$  моменты времени, где  $N$  — количество временных отсчетов на интервале анализа;  $\Delta t$  — шаг дискретизации;  $\mathcal{F}(f)$  — вектор, содержащий комплексную гармонику с частотой  $f$  и длительностью, равной интервалу анализа;  $T$  — операция транспонирования.

При использовании (1) подразумевается, что истинный пеленг  $\theta$  на судно известен в каждый момент времени  $t$ , а отношение сигнал/помеха (с/п) многократно больше единицы.

**Практическая часть.** Для вычисления (1) по экспериментальным данным нами использовались сигналы от судна, когда оно находилось в пределах  $\pm 30^\circ$  от направления бегущей волны ФАР. Для обеспечения с/п  $\gg 1$  использовались частоты  $f$  на которых шумоизлучение судна имеет мощные по интенсивности дискретные составляющие, которые достоверно принадлежат данному судну. Длительность используемых реализаций равна 8 с. Динамика откликов ФАР, полученная согласно (1) на некоторой частоте в результате семичасового наблюдения, показана на рисунке ниже.

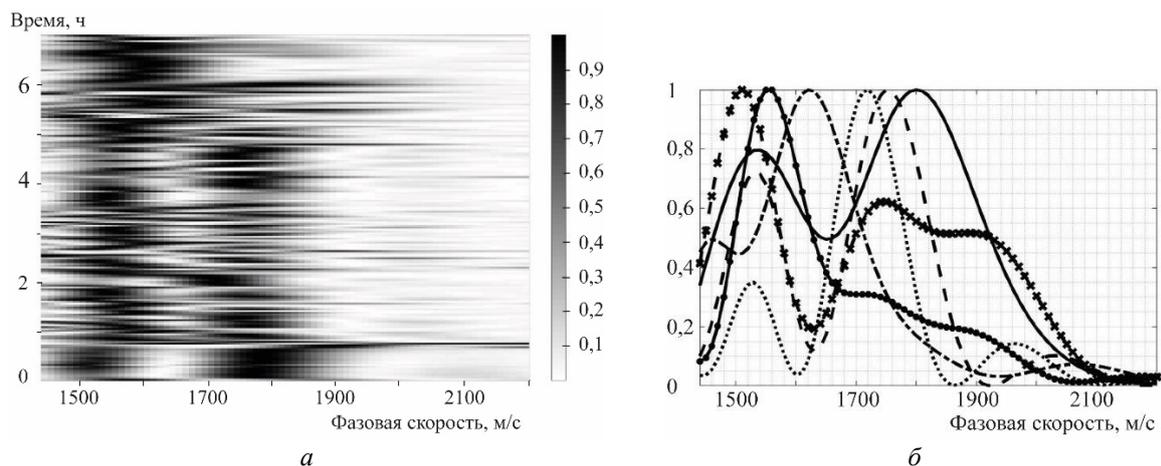


Рис. 1. Динамика откликов ФАР в результате семичасового наблюдения за дискретной составляющей судна на некоторой частоте  $f$  (а) и отклики, взятые в некоторые моменты времени  $t$  (б).

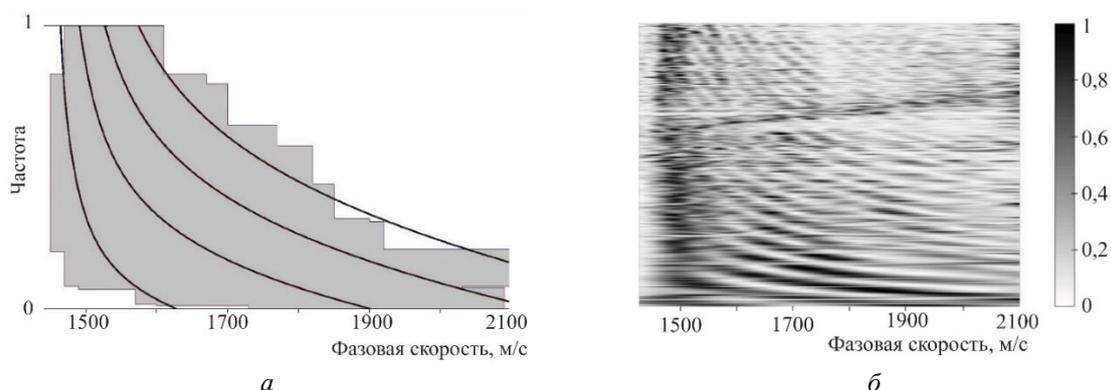


Рис. 2. Область возможных значений фазовых скоростей мод, полученная в результате анализа динамики откликов ФАР на дискретные составляющие судна.

$a$  — черными линиями обозначены дисперсионные кривые, оценённые с помощью импульсного метода;  
 $b$  — отклики ФАР на шумоизлучение судна в некотором диапазоне частот, полученные в фиксированный момент времени  $t$  при расстоянии между ФАР и судном  $\sim 2$  км.

По данным на рис. 1 невозможно выделить отдельные моды или узнать их точное количество, однако, мы можем увидеть, что значения фазовых скоростей мод на этой частоте не выходят за пределы диапазона от 1460 до 1950 м/с. Таким же образом можно оценить диапазон возможных значений ФСМ на всех частотах, на которых присутствуют дискретные составляющие в спектре шумоизлучения судна. Для тех частот, где дискретные составляющие отсутствуют и на которых оценки ФСМ не были получены экспериментально, они были получены путём линейной интерполяции.

Таким образом на рис. 2,  $a$  получилась замкнутая закрашенная серая область возможных значений ФСМ. Наложив на неё дисперсионные кривые, оценённые с помощью импульсного метода [4], можно увидеть, что полученная область хорошо совпадает с ними, что подтверждает состоятельность полученных оценок ФСМ по шумам судоходства.

Одним из главных преимуществ интерференционного метода является возможность оценивать ФСМ даже если источник сигнала находится очень близко к ФАР. В случае, когда судно находится достаточно близко к ФАР, условие  $c/\psi \gg 1$  выполняется не только для дискретных составляющих, но и для сплошной части спектра. В связи с этим даже по одной реализации можно получить отклики ФАР в широком диапазоне частот (рис. 2,  $b$ ) и оценить диапазон ФСМ.

Остаётся ключевой вопрос: откуда получать информацию об истинном пеленге  $\theta(t)$ ? Возможное решение — организовать передачу данных с автоматической информационной системы, подобной [6], на блок обработки данных с ФАР, что потребует наличия в ГАС канала передачи информации в реальном времени и сделает результаты измерений зависимыми от

точности поставляемой информации — не лучшее решение для ГАС специального назначения. Для обеспечения независимости ГАС от других источников информации необходимо двигаться в направлении автоматического измерения ФСМ самой ГАС в реальном масштабе времени.

В случае, если ГАС является многопозиционной, открывается интересное решение. Известно [7, стр. 258–259], что при пространственной обработке сигналов, поступающих от судов, расположенных в направлениях, близких к нормали линейной ФАР, решение задачи обнаружения и оценки пеленга на судно алгоритмом, согласованным с распространением сигналов в мелком море, и алгоритмом, основанном на модели безграничного пространства, совпадают. Это значит, что в некотором секторе направлений, близких к нормали ФАР, алгоритм пространственной обработки для модели свободного полупространства обеспечит дальность обнаружения и точность оценки пеленга судна такую же или незначительно хуже, чем при использовании более сложных алгоритмов. Расположив хотя бы две ФАР таким образом, чтобы они пересекались секторами обзора, близкими к нормали ФАР, можно, используя простейшие алгоритмы пространственной обработки и не зная ничего о среде распространения сигналов, отслеживать координаты некоторых судов с помощью метода триангуляции. Передавая координаты обнаруженного судна и оценки его спектральной плотности мощности на третью ФАР, которая «смотрит» в тот же сектор направлением бегущей волны, можно применять (1) для оценки ФСМ. Таким образом, многопозиционная ГАС является самодостаточной в плане возможности решения задачи оценки диапазона возможных значений ФСМ по шумам судоходства.

**Выводы.** Экспериментально доказано, что *по шумам судоходства можно оценивать диапазон возможных значений ФСМ*. В случае наличия многопозиционной ГАС появляются предпосылки к созданию интеллектуальной ГАС, способной без дополнительной информации, получаемой от других систем мониторинга подводной и надводной обстановки, в режиме реального времени и в условиях абсолютной скрытности оценивать ФСМ.

По полученной динамике откликов ФАР на рис. 1, *а* можно говорить о том, что оценки ФСМ сильно изменчивы, что говорит о случайном характере принимаемых сигналов в пространственной области. Вид наблюдаемых биений на рис. 1 характерен для *суммы гармонических колебаний с близкими частотами и случайными начальными фазами*.

Оценка модового состава принимаемого сигнала может быть полезной в алгоритмах вторичной обработки — область возможных значений ФСМ может быть дополнительным классификационным признаком.

### *Литература*

1. Розенберг А. В. Методы определения параметров гидроакустической модели волновода // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.н. 1997. 166 с.
2. Елисеевнин В. А. Усредненный отклик горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акуст. жур. 2004. Т. 50, № 2. С. 193–197.
3. Елисеевнин В. А. Выделение нормальных волн с помощью протяженной горизонтальной линейной антенны // Вопросы кораблестроения. Сер. «Акустика». 1981. Вып. 20. С. 82–89.
4. Гринюк А. В., Кравченко В. Н., Махнев Ю. В., Трофимов А. Т. Анализ пространственно-временных характеристик низкочастотных гидроакустических сигналов в мелком море // Тр. Всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: 2016. С. 376–378.
5. Махнев Ю. В. Моделирование и анализ точности алгоритмов шумопеленгации источников низкочастотных гидроакустических сигналов в мелком море // Вест. ВГУ. Сер. «Системный анализ и информационные технологии». 2019. № 4. С. 72–84.
6. Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic. – Режим доступа: <https://www.marinetraffic.com>. – (Дата обращения: 10.03.2022).
7. Ильичев В. И. Калюжный А. Я., Красный Л. Г., Лапий В. Ю. Статистическая теория обнаружения гидроакустических сигналов. М.: Наука, 1992. 415 с.

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СЛУЧАЙНОГО ВОЛНОВОГО ПАКЕТА, ПРИНИМАЕМОГО НА НИЗКОЧАСТОТНУЮ АНТЕННУ В МЕЛКОМ МОРЕ

*В. Н. Кравченко*, канд. техн. наук, *Ю. В. Махнев*, *А. Т. Трофимов*, д-р техн. наук  
АО «Научно-исследовательский институт «Атолл», Дубна, Россия

## SYNTHESIS OF OPTIMAL ALGORITHM FOR SPATIAL PROCESSING OF A RANDOM WAVE PACKET RECEIVED ON A LOW-FREQUENCY ANTENNA IN A SHALLOW SEA

*V. N. Kravchenko*, Ph.D., *Y. V. Makhnev*, *A. T. Trofimov*, Dr.Sc.  
JSC «Scientific and Research Institute «Atoll», Dubna, Russia

*Статья посвящена синтезу оптимального алгоритма пространственной обработки низкочастотных гидроакустических сигналов, принимаемых на антенну в мелком море. Принимаемые сигналы описываются как случайные волновые пакеты. Показано, что оптимальный алгоритм, напрямую проистекающий из логарифма отношения правдоподобия, основан на Винеровской фильтрации. Получены асимптотически оптимальные приближения, позволяющие сократить вычислительные затраты.*

*The article is devoted to the synthesis of optimal algorithm for spatial processing of low-frequency signals received by an antenna in a shallow sea. The received signals were described as random wave packets. The optimal algorithm which directly stems from the logarithm of the likelihood ratio, based on Wiener filtering was shown. Asymptotically optimal approximations, allowing to reduce computational costs, were obtained.*

Эффективность решения задачи шумопеленгования с помощью протяженных многоэлементных антенн, функционирующих в мелком море, определяется отношением сигнал/помеха на выходе тракта пространственной обработки. Наибольшее отношение сигнал/помеха обеспечивается при полном согласовании модельного ожидаемого сигнала с сигналом на апертуре антенны. Модель ожидаемого сигнала зависит от таких факторов как: геометрия расположения приёмников антенны относительно источника сигнала; частотно-зависимые коэффициенты затухания и фазовые скорости мод; рабочая частота; глубина, скорость и направление движения источника сигнала; шумы окружающей среды и др. Задача осложняется необходимостью обнаружения источника сигнала при наличии мешающего воздействия шумоизлучения от множества более мощных источников, следовательно, ставится задача обнаружения на фоне помех со структурой сигнала.

В широко известных алгоритмах Бартлетта, Кейпона, Шмидта (MUSIC), Джонсона (EV) и их модификациях [1] используется вектор, содержащий ожидаемый сигнал (поле давлений) на антенне, исходящий от точечного источника, который в литературе называют «вектор направления наблюдения (управляющий, опорный)» [1, стр. 16], «направляющий вектор» [2] или «сканирующий вектор» [3]. Математическая модель ожидаемого сигнала в мелком море, содержащегося в этом векторе, представляется в виде суперпозиции конечного числа  $M(\omega)$  распространяющихся мод [4]

$$W(n, \omega) = \sum_{m=1}^{M(\omega)} A(m, \omega) \cdot e^{1j \left( \frac{\omega \cdot d(n)}{c(m, \omega)} + \varphi(m, \omega) \right)}, \quad (1)$$

где  $W$  — вектор направления;  $n = 1, 2, \dots, N$  номера приёмников антенны, где  $N$  — количество приёмников;  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  — частота сигнала;  $m$  — номер моды;  $A$  — амплитуда  $m$ -ой моды;  $1j$  — мнимая единица;  $d(n)$  — расстояние от  $n$ -го приёмника до источника сигнала;  $c$  и  $\varphi$  — фазовая скорость и начальная фаза мод соответственно.

Известно, что под влиянием различных физических и технических факторов [5] амплитуды  $A(m, \omega)$ , начальные фазы  $\varphi(m, \omega)$  и фазовые скорости  $c(m, \omega)$  мод являются случайными. В связи с этим сигнал (1) нами назван случайным волновым пакетом (СВП) [6]. Реализовать эффективное согласование по математическому ожиданию сигнала в этом случае сложно из-за огромного числа возможных сочетаний параметров  $A$ ,  $\varphi$  и  $c$  мод. В связи со случайным характером сигнала (1) используется согласование 2-го рода, т.е. по корреляции.

Амплитуды мод зависят от глубины источника и приёмника сигнала. В общем случае эти глубины можно считать равновероятными, а, следовательно, и значения амплитуд мод равновероятны. С учётом этого получим ковариационную матрицу сигнала (1) на некоторой частоте  $\omega$  из области нижних частот

$$R(\omega) = \begin{bmatrix} W(1) \cdot W(1)' & \dots & W(1) \cdot W(N)' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W(N) \cdot W(1)' & \dots & W(N) \cdot W(N)' \end{bmatrix} =$$

$$= D(\omega) \cdot \begin{bmatrix} 1 & \dots & \frac{\sum_m \exp\left(1j \frac{\omega \cdot (d(1) - d(N))}{c(m, \omega)}\right)}{M(\omega)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\sum_m \exp\left(1j \frac{\omega \cdot (d(N) - d(1))}{c(m, \omega)}\right)}{M(\omega)} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $R$  — ковариационная матрица ожидаемого сигнала; черта сверху  $'$  обозначает операцию вероятностного усреднения;  $D(\omega) = \overline{\sum_m A(m, \omega)^2} = M(\omega) \cdot \frac{a^2 + ab + b^2}{3}$  — дисперсия амплитуд мод, где  $a$  и  $b$  задают отрезок, на котором  $A(m, \omega)$  равновероятно распределена;  $'$  — комплексное сопряжение.

Как видно, (2) не зависит от случайных начальных фаз мод в СВП. Считаем, что значения функции  $c(m, \omega)$  известны с некоторой точностью. При описании корреляционной матрицы принимаемого сигнала необходимо учесть:

1. межмодовое взаимодействие при конкретных размерах апертуры, направлениях на источник сигнала, рабочих частотах и фазовых скоростях мод;
2. неточность знания значений функции  $c(m, \omega)$ . Для этого введём экспоненциально-коррелированную зависимость, нормируем (2) на константу  $D(\omega)$  и перепишем в следующем виде

$$R_s(i, j, \omega) = \frac{1}{M(\omega)} \sum_{m=1}^{M(\omega)} \left( e^{-\frac{f_0}{f \cdot L} \cdot (0,89 \cdot \gamma(m) + 0,69 \cdot k_c(m, \omega)) \cdot |d(i) - d(j)|} \cdot e^{1j \frac{\omega \cdot (d(i) - d(j))}{c(m, \omega)}} \right), \quad (3)$$

где  $R_s$  — корреляционная матрица ожидаемого сигнала;  $i, j = 1, 2, \dots, N$ ;  $f_0$  — проектная частота антенны;  $L$  — длина антенны;  $\gamma(m)$  — погрешность знания фазовой скорости  $m$ -ой моды, выраженная в долях ширины диаграммы направленности антенны приблизительно по уровню  $-3$  дБ, задаваемому коэффициентом  $0,89$ ; значение  $0,69$  подобрано по результатам моделирования и ещё нуждается в уточнении;  $k_c(m, \omega)$  — коэффициент расширения пространственного спектра [7] из-за межмодового взаимодействия

$$k_c(m, \omega) = \begin{cases} -4 \cdot \left( \frac{cc(m, \omega)^2}{(M(\omega) - 1)^2} - \frac{cc(m, \omega)}{M(\omega) - 1} \right), & \text{при } M(\omega) > 1; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$cc(m, \omega) = \sum_{i=1}^{M(\omega)} \left( \left| \frac{P(i, \omega)^+ \cdot P(m, \omega)}{\sqrt{P(i, \omega)^+ \cdot P(i, \omega) \cdot P(m, \omega)^+ \cdot P(m, \omega)}} \right| \right) - 1;$$

$$P(m, \omega) = \left[ e^{1j \frac{\omega \cdot d(1)}{c(m, \omega)}}, e^{1j \frac{\omega \cdot d(2)}{c(m, \omega)}}, \dots, e^{1j \frac{\omega \cdot d(N)}{c(m, \omega)}} \right]^T,$$

где  $cc$  — коэффициент, показывающий степень перекрытия основного лепестка характеристики направленности на  $-y$ ю моду с основными лепестками остальных мод;  $P(m, \omega)$  — вектор-столбец, описывающий принимаемую на антенну  $m$ -ую моду на частоте  $\omega$ ;  $+$  — эрмитово сопряжение;  $T$  — операция транспонирования. Коэффициент  $k_c(m, \omega)$  близок к нулю в случаях, если основной лепесток  $m$ -ой моды не перекрывается или наоборот очень сильно перекрывается со всеми основными лепестками других мод. Коэффициент  $k_c$  равен единице, когда сумма перекрытий с другими модами  $cc(m, \omega)$  равна  $(M(\omega) - 1)/2$ .

Условимся, что в первом приближении плотность распределения вероятности (ПРВ) значений СВП (1) является гауссовской. Тогда, как известно [8, стр. 234], оптимальный алгоритм

обнаружения комплексного случайного гауссовского сигнала проистекает из логарифма отношения правдоподобия  $\ln(L)$ , который записывается как

$$\frac{\ln(L)}{\ln(C)} = X^+ \cdot ((R_n)^{-1} - (R_s + R_n)^{-1}) \cdot X, \quad (4)$$

где  $C$  — константа;  $X$  — реализация СВП (вектор-столбец);  $R_n$  — ковариационная матрица помех;  $( )^{-1}$  — оператор обращения матрицы.

Правая часть равенства (4) является достаточной статистикой. Как отмечалось в [8], непосредственная реализация выражения (4) неконструктивна, так как предполагает сложные в вычислительном отношении операции. С целью сокращения вычислительных затрат преобразуем вычисление выражения (4) к следующему виду

$$\frac{\ln(L)}{\ln(C)} = X^+ \cdot (R_n)^{-1} \cdot R_s \cdot (R_s + R_n)^{-1} \cdot X. \quad (5)$$

В выражении (5) можно заметить, что при вычислении достаточной статистики используется выражение  $R_s \cdot (R_s + R_n)^{-1} \cdot X$ , которое соответствует вычислению винеровского вектора весовых коэффициентов. Интересно отметить, что такой же вектор вычисляется при адаптивной обработке сигналов с помощью градиентных методов и поиска минимума среднеквадратической ошибки [9]. Примечательно то, что в градиентных методах не используют информацию о ПРВ принимаемых сигналов, тогда как (5) проистекает напрямую из отношения правдоподобия при гауссовских ПРВ. Наличие в (5) винеровской фильтрации подтверждается использованием каскада из двух фильтров, обеляющего  $(R_s + R_n)^{-1}$  и восстанавливающего  $R_s$ , точно, как при реализации фильтра Колмогорова-Винера с бесконечной импульсной характеристикой [10, раздел 4.2.2]. Продемонстрируем работу восстанавливающего фильтра  $R_s \cdot X$  на модельном примере, в котором СВП, состоящий из четырех мод, при воздействии белого шума (входное отношение сигнал/шум 0,135) был принят на линейную антенну, состоящую из ста приёмных элементов. Реальные части СВП без шума, в шуме, до и после фильтрации, а также их относительные энергетические спектры представлены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что после фильтрации случайный волновой пакет успешно восстанавливается. При вычислении (5), для сокращения вычислительных затрат, можно использовать различные известные приближения, используемые при построении фильтров Винера. Отметим, что при сигнал/шум  $\gg 1$  вычисление достаточной статистики сводится к  $X^+ \cdot (R_n)^{-1} \cdot X$ . Напротив, при сигнал/шум  $\ll 1$  приходим к  $X^+ \cdot (R_n)^{-1} \cdot R_s \cdot (R_n)^{-1} \cdot X$ . И в том, и в другом случае наибольшую вычислительную сложность представляет операция обращения матрицы  $R_n$ .

Опишем матрицу  $R_n$ . В случае наличия пространственно-коррелированных с сигналом помех в  $X$ , фильтры  $(R_n)^{-1}$  и  $(R_s + R_n)^{-1}$  являются отбеливающими (декоррелирующими). Корреляционную матрицу принимаемых помех  $R_n$  можно представить с использованием выражения (3), с учетом, что  $d$  (расстояние до источника сигнала) относится к помехе

$$R_n(\omega) = \sum_{p=1}^{Np} \left( A(p) \cdot R_s(\omega) \Big|_{\text{при } d=d_p} \right) + \sigma^2 \cdot I, \quad (6)$$

где  $Np$  — количество пространственно-коррелированных с сигналом помех;  $A(p)$  — интенсивность помехи;  $d_p$  — расстояния от приёмников антенны до  $p$ -ой помехи;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение шума;  $I$  — единичная матрица.

Если  $Np = 0$ , то (6) сводится к диагональной корреляционной матрице белого шума, обращение которой не представляет затруднений. Если  $Np > 0$ , то для построения обеляющего фильтра необходимо знать или оценивать интенсивности помех и их координаты. Получить необходимые параметры помех можно, например, при реализации процедуры итерационного обнаружения с последующей компенсацией обнаруженных источников сигналов, следуя от наиболее интенсивных к самым слабым. Данная процедура была апробирована нами на экспериментальных данных, а результаты изложены в [11].

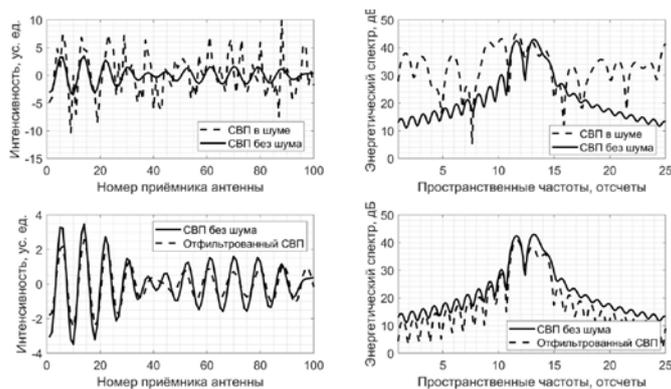


Рис. 1. Реальные части СВП без шума и в шуме (слева сверху), их относительные энергетические пространственные спектры (справа сверху), реальные части СВП до и после фильтрации с использованием матрицы  $R_s$  (слева внизу) и их относительные энергетические пространственные спектры (справа внизу).

Показано, что вычислительная сложность (5) в  $Np + 1$  раз больше, чем при реализации классического алгоритма Кейпона, однако для использования (5) не требуется получения оценки ковариационной матрицы принимаемых сигналов, как это требуется в алгоритмах подобных алгоритму Кейпона. Сокращение вычислительных затрат возможно за счёт использования ограниченного числа собственных значений и функций корреляционной матрицы  $R_s$ , которые могут быть вычислены заранее и не требуют пересчета при каждой новой реализации входного сигнала. В предельном случае сокращения вычислительных затрат используется одна, первая собственная функция матрицы  $R_s$ . Использование собственных функций  $R_s$  будет эффективнее чем использование «векторов наблюдения» (1) при прочих равных условиях, в случаях если  $k_c(t, \omega)$  значительно отличается от нуля и (или) функция  $s(t, \omega)$  известна неточно. В противном случае результат пространственной обработки по собственным функциям будет совпадать с обработкой по «векторам наблюдения».

#### Литература

1. Малышкин Г. С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Адаптивные методы. СПб.: ОАО «Концерн "ЦНИИ "Электронприбор», 2011. Т. 2. 374 с.
2. Сазонтов А. Г., Малеханов А. И. Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // Акуст. жур. 2015. Т. 61, № 2. С. 233–253.
3. Кузнецов Г. Н., Лебедев О. В. О возможности применения модели с эквивалентной плоской волной для повышения точности пеленгования низкочастотных сигналов в мелком море // Акуст. жур. 2012. Т. 58, № 5. С. 628–638.
4. Елисеевнин В. А. Усредненный отклик горизонтальной линейной антенны в мелком море // Акуст. жур. 2004. Т. 50, № 2. С. 193–197.
5. Малышкин Г. С. Анализ влияния физических и технических факторов на эффективность адаптивных алгоритмов обработки гидроакустических сигналов // Акуст. жур. 2014. Т. 60, № 3. С. 284–299.
6. Махнев Ю. В., Гринюк А. В., Кравченко В. Н., Трофимов А. Т. Синтез алгоритмов пространственной обработки в задачах шумопеленгации в низкочастотной гидроакустической системе // Тр. Всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. С. 341–344.
7. Махнев Ю. В. Моделирование и анализ точности алгоритмов шумопеленгации источников низкочастотных гидроакустических сигналов в мелком море // Вест. ВГУ. Сер. «Системный анализ и информационные технологии». 2019. № 4. С. 72–84.
8. Малышкин Г. С. Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов // Оптимальные методы. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. Т. 1. 400 с.
9. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер.с англ. М: Радио и связь, 1989. 440 с.
10. Гельгор А. Л. Общая теория связи. Винеровская фильтрация / Под ред. А. Л. Гельгор, Т. Е. Гельгор, А. И. Горлов, Е. А. Попов // Учебно-методическое пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. 185 с.
11. Махнев Ю. В., Трофимов А. Т. Экспериментальная проверка оценочно-компенсационного алгоритма обнаружения морских объектов на фоне интенсивных локальных источников звука в мелком море // Тр. VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» МАГ-2021. СПб. 2021.

## О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МЕЛКОГО МОРЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОДВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ

*П. Н. Кравчун*, канд. физ.-мат. наук

Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

## EFFECT OF GEOMETRY OF THE ACOUSTIC MONITORING SYSTEM ON THE SOLUTION STABILITY IN PRESENCE OF UNDERWATER CURRENTS

*P. N. Kravchun*, Ph.D.

Faculty of Physics, Moscow State Lomonosov University, Moscow, Russia

*Рассмотрено влияние подводного течения, отклоняющего линейную приемную антенну системы акустического мониторинга мелкого моря, на ошибки определения основных параметров среды (воды и грунта), а также задача оптимального выбора пространственного положения излучателя, позволяющего повысить устойчивость решения задачи по отношению к воздействию подводных течений на антенну.*

*The influence of the underwater current deflecting the linear receiving antenna of the acoustic monitoring system of the shallow sea on the errors of determining the main parameters of the environment (water and bottom), as well as the problem of optimal selection of the spatial position of the emitter, which makes it possible to increase the stability of the solution of the problem in relation to the effect of underwater currents on the antenna, is considered.*

Одним из наиболее перспективных методов мониторинга океана является акустический мониторинг, пригодный для акваторий как глобальных, так и локальных масштабов. В его основе лежит идея акустической томографии моря: получение информации о состоянии водной среды и грунта путем анализа акустических полей в них [1]. Акустический мониторинг не требует применения научно-исследовательских судов и мощных источников энергии, что весьма важно для снижения трудоемкости и финансовых затрат. Однако практическая реализация метода встречает серьезные трудности. Одна из основных проблем связана с влиянием подводных течений на приемные и излучающие системы. В данной работе рассматриваются способы снижения влияния течений на работу системы малопараметрического акустического мониторинга мелкого моря и обсуждаются возможности оптимизации гидродинамики антенн и геометрии системы.

Рассмотрим систему акустического мониторинга, расположенную в слое воды с жидким однородным дном и состоящую из излучателя, имеющего размеры, малые в сравнении с длиной звуковой волны на рабочей частоте, и многоэлементной приемной вертикальной антенны. Будем считать, что нижняя точка антенны закреплена на дне, а верхняя связана с притопленным бумом, растягивающим антенну по вертикали. В качестве модели течения будем рассматривать экмановскую модель трехмерно-неоднородного градиентного течения [2]. Конфигурация и натяжение антенны на течениях могут быть рассчитаны с помощью алгоритма, схема которого изложена в [3]. В данной работе рассматривается задача об определении средних скоростей звука в водном слое и в верхнем слое грунта (т.н. «малопараметрическая» схема мониторинга).

Одна из простейших схем мониторинга мелкого моря основана на селекции мод (нормальных волн) протяженной вертикальной антенной. Подводные течения, искривляющие антенну, затрудняют селекцию. Проведенные расчеты показали, что при приеме мод, на которые антенна не настроена, сигнал модовой антенны резко искажается даже при малых скоростях течения, в то время как при приеме «своих» мод, на которые антенна настроена, сигнал в некотором диапазоне скоростей течения остается практически постоянным, и лишь при дальнейшем увеличении скорости начинает искажаться. Наличие участка устойчивости на зависимости выходного сигнала модовой антенны от скорости течения при приеме «своих» мод, на которые антенна настроена, наводит на мысль о перспективности для решения задач мониторинга метода согласованного поля (МСП). Сущность МСП заключается в том, что реальное акустическое поле  $p$  источника звука, принимаемое линейной гидроакустической

антенной, коррелируется с расчетным акустическим полем  $p^{rplc}$  («репликой» поля, рассчитанной на базе априорной информации о физических параметрах среды):

$$B = \sum_{j=1}^N p_j^{rplc} \cdot p_j,$$

где  $B$  — корреляционная функция, получившая в литературе название «МСП-процессор»;  $j$  — номер моды (суммирование производится по всем  $N$  модам, распространяющимся в волноводе).

Акустические поля  $p_j$  и  $p_j^{rplc}$  определяются соответственно реальными и предполагаемыми параметрами среды (например, скоростями звука в воде и в грунте). МСП-процессор является многоэкстремальной функцией этих параметров. В силу ортогональности системы функций, описывающих волноводные моды, глобальный максимум МСП-процессора наблюдается при совпадении расчетной «реплики» поля и поля, принятого антенной. Таким образом, МСП-процессор является целевой функцией, отыскание глобального максимума которой позволяет найти параметры среды. Поскольку МСП, по существу, предполагает «настройку» антенны на все моды, распространяющиеся в водном слое, можно ожидать, что будет существовать интервал скоростей течений, в пределах которого параметры среды могут быть определены практически без ошибки, связанной с деформацией антенны на течении. Действительно, из расчетов следует, что МСП в сравнении с селекцией отдельных мод обеспечивает более высокую устойчивость системы мониторинга к воздействию течений. По мере увеличения скорости течения ошибки определения параметров воды и грунта сначала растут незначительно и лишь при достижении скоростью течения некоторого «критического» значения резко, скачком увеличиваются (рис. 1).

Другими словами, в диапазоне скоростей течения ниже критической метод согласованного поля обеспечивает достаточно высокую устойчивость решения задачи по отношению к ошибкам, вызванным отклонением антенны на течении, а при небольших скоростях течения ошибки отсутствуют совсем, несмотря на отклонение антенны. Отметим, что решение задачи об определении скорости звука в воде менее чувствительно к воздействию течения на антенну, чем решение для скорости звука в грунте, т.е. значения критической скорости течения в первом случае выше, чем во втором. Увеличение значения критической скорости может быть достигнуто оптимизацией гидромеханических параметров антенны (прежде всего, уменьшением гидродинамического сопротивления кабель-троса и буя, уменьшением погонной плотности кабель-троса, увеличением объема буя, уменьшением амплитуды срывного флаттера кабель-троса).

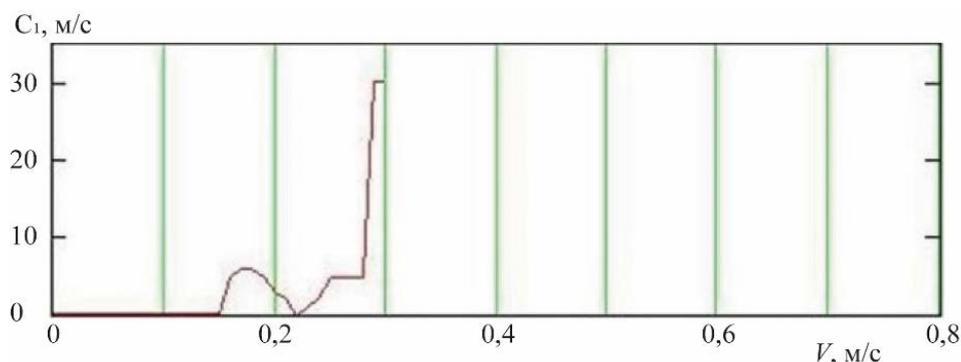


Рис. 1. Зависимость ошибки определения средней скорости звука в водном слое от скорости подводного течения.

Глубина моря 600 м, частота 40 Гц, расстояние между излучателем и приемной заякоренной антенной 30 км, глубина погружения излучателя 120 м.

Из проведенных расчетов следует, что даже несложное облагораживание гидродинамики антенны позволяет увеличить диапазон «докритических» скоростей течений почти в 2 раза. Значительное увеличение диапазона «докритических» скоростей течения может быть достигнуто также оптимизацией рабочей частоты и геометрии системы мониторинга (выбором оптимальных глубины излучателя и расстояния между излучателем и приемной антенной). Разумеется, частота и геометрия системы во многом диктуются характером решаемой обратной задачи (масштабом изучаемого процесса, его локализацией по глубине и др.). Однако даже небольшие изменения этих параметров в окрестности значений, определяемых масштабом и локализацией исследуемого процесса, позволяют повысить устойчивость системы к воздействию течений. Заметим, что оптимизация геометрии и частоты фактически эквивалентна оптимизации набора мод, который, с одной стороны, должен нести максимальную информацию об изучаемом процессе, а с другой стороны, быть наиболее устойчивым к влиянию течений. Оптимальный диапазон частот излучения зависит от предполагаемого диапазона изменения скоростей звука в воде и грунте: чем шире этот диапазон, тем ниже должна быть частота. В нашем случае (при изменении скоростей звука не более чем на 100 м/с) оптимальная частота близка к значению 20 Гц.

Возможности повышения устойчивости системы к воздействию течения за счет оптимизации глубины погружения излучателя показаны на рис. 2, из которого следует, что выбор глубины в окрестности значения 320 м позволяет для одной из выбранных антенных систем заметно повысить «критическую» скорость течения (до 0,6 м/с при определении скорости звука в воде и до 0,9 м/с при определении скорости звука в грунте). Более полную информацию о возможностях оптимизации геометрии системы дают трехмерные зависимости критической скорости течения от координат излучателя (глубины погружения  $z$  и горизонтального расстояния  $R$  между излучателем и приемной антенной).

На рис. 3 представлена такая зависимость, рассчитанная для задачи определения скорости звука в водном слое (параметры антенны и водного слоя те же, что и выше, диапазон изменения  $z$  и  $R$  указан на рис. 4). Оптимальная геометрия системы, обеспечивающая максимальную устойчивость системы на течении, соответствует глобальному максимуму критической скорости течения в выбранном диапазоне изменения координат излучателя.

Весьма наглядное представление об оптимальных значениях координат излучателя дает также иллюстрация, где значения критической скорости отображены оттенками черно-белого изображения (рис. 4). Эту иллюстрацию можно интерпретировать как разрез водного слоя, на котором плотностью окраски показаны значения критической скорости течения, которые обеспечиваются при расположении излучателя в соответствующей точке слоя (светлые оттенки соответствуют большим значениям критической скорости, темные — малым). Из рис. 3 и 4 следует, что экстремумов критической скорости достаточно много, но области, в которых они сосредоточены, весьма малы.

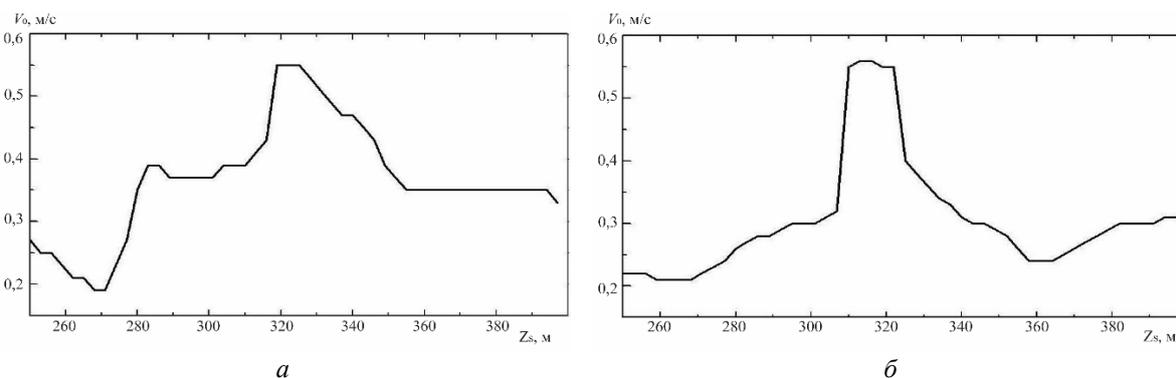


Рис. 2. Зависимости критической скорости течения от глубины погружения источника при решении задачи о нахождении средней скорости звука в водном слое и в грунте.

$a$  — в водном слое;  $b$  — в грунте; частота 20 Гц; расстояние от излучателя до приемной антенны 30 км.

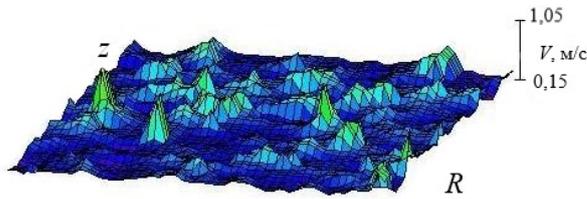


Рис. 3. Зависимость критической скорости течения (вертикальная ось) от координат излучателя.

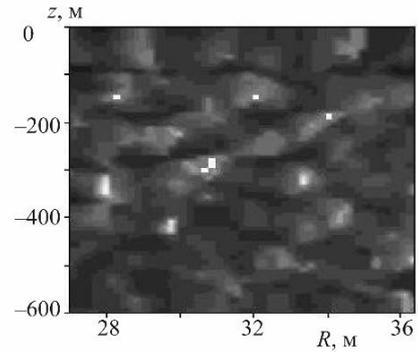


Рис. 4. Зависимость критической скорости течения от координат излучателя.

Области оптимальных координат излучателя при определении скорости звука в воде и скорости звука в грунте, вообще говоря, не совпадают. Однако, во всех рассмотренных нами случаях, тем не менее, существовали области перекрытия максимумов  $v_{кр}(R, z)$ , построенных для этих задач. Это свидетельствует о возможности оптимизации геометрии систем для нахождения скорости звука в воде и в грунте одновременно. Аналогичные зависимости критической скорости течения от координат излучателя были построены и для задачи определения отношения плотностей воды и грунта.

#### *Литература*

1. Munk W., Worcester P., Wunsch C. Ocean acoustic tomography. Cambridge: Cambridge univ. press, 1995.
2. Гусев А. М. Основы океанологии. М.: Изд-во МГУ, 1983.
3. Кравчун П. Н., Прошутин Д. В. Придонные линейные гидроакустические антенны на трехмерно-неоднородных течениях: расчет и оптимизация // Измерительная техника. 1996. № 7. С. 58–61.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЛИНЕЙКИ ГИДРОФОНОВ В АДАПТИВНОМ КОМПЕНСАТОРЕ ПОМЕХ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОСТИ

*V. S. Kolmogorov*, д-р техн. наук, *A. B. Priima*, *S. A. Shpak*, канд. техн. наук  
Тихоокеанское высшее военно-морское училище, Владивосток, Россия

## USING A VERTICAL LINE OF HYDROPHONES IN ADAPTIVE NOISE COMPENSATOR UNDER MULTIPATH CONDITIONS

*V. S. Kolmogorov*, Dr.Sc., *A. V. Priima*, *S. A. Shpak*, Ph.D.  
Pacific Higher Naval College, Vladivostok, Russia

*Экспериментальные исследования показали, что использование линейки гидрофонов в адаптивном компенсаторе помех позволяет повысить помехоустойчивость гидроакустического средства в условиях многолучевости.*

*Experimental studies have shown that the hydrophones line use in adaptive noise compensator makes it possible to increase the noise immunity of hydroacoustic device in multipath conditions.*

Проблема повышения помехоустойчивости средств измерения первичного гидроакустического поля малозумных объектов является актуальной при регистрации в мелководных акваториях заводов изготовителей подводных аппаратов. Специфика измерения первичного гидроакустического поля малозумных объектов в мелководных акваториях связана с многолучевостью распространения сигнала от них. Поэтому одна из задач при регистрации акустического поля малозумных морских объектов заключается в повышении помехоустойчивости в условиях многолучевости принимаемого флюктуирующего сигнала в мелководной акватории. С целью повышения помехоустойчивости средств регистрации первичного гидроакустического поля возможно использование принципов адаптивной фильтрации [1, 2]. При этом методика подавления шумов моря в условиях повышенного уровня шумов моря предполагает использование второго измерительного гидрофона, расположенного таким образом, чтобы сигнал от него мог использоваться как образцовый источник помехи. Использование адаптивного фильтра, на который с одной стороны подается смесь сигнала гидроакустического поля морского объекта с помехой, а с другой стороны измеренный с помощью второго гидрофона образцовый сигнал помехи приведет к компенсации помех приему сигнала от морского объекта. Адаптивная компенсация помех с использованием адаптивного фильтра типа LMS [3, 4] предполагает Винеровскую фильтрацию сигнала с использованием уравнения Винера-Хопфа, согласно которому весовые коэффициенты адаптивного фильтра вычисляются путем перемножения двух корреляционных матриц согласно выражению:

$$w = R_{xx}^{-1} p_{dx}, \quad (1)$$

где  $R_{xx}$  — автокорреляционная матрица входного сигнала с опорного гидрофона;  $p_{dx}$  — взаимно корреляционная матрица между сигналами с измерительного и опорного (образцового) гидрофонов.

Пространственно-корреляционные характеристики акустического поля согласно уравнению Винера-Хинчена связаны со спектральными характеристиками, которые в мелководных районах имеют весьма сложный и изменчивый в пространстве характер из-за интерференционных явлений. Интерференционная структура акустического поля в морском волноводе формируется в результате суперпозиции как рефрагированных, так и многократно отраженных от поверхности и дна гидроакустических волн. С целью оценки влияния многолучевости на коэффициент корреляции между двумя приемниками было произведено имитационное моделирование с использованием системы Simulink. Результаты моделирования представлены на рис. 1, 2. Здесь с помощью линий задержек (Transport delay) имитировалось различное время пробега по трем лучам, которые суммировались на гидрофонах. После этого производилось вычисление коэффициента взаимной корреляции и регистрация спектров с «разнесенных» гидрофонов.

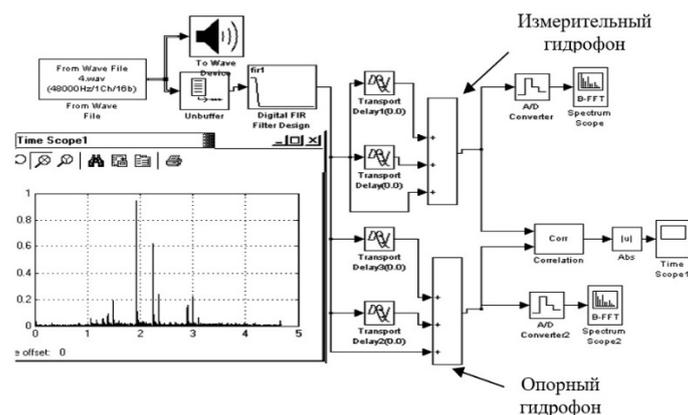


Рис. 1. Коэффициент корреляции при 3- лучевом распространении, время задержки равно нулю.

Рисунок представлен исключительно в редакции автора.

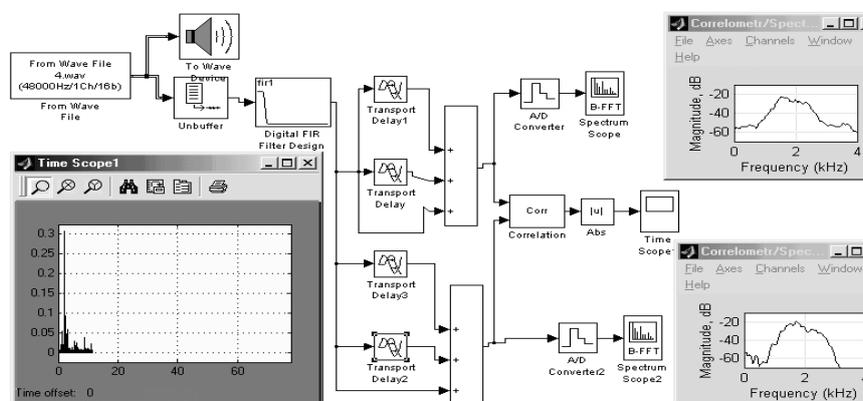


Рис. 2. Коэффициент корреляции при 3-лучевом распространении, время задержки не равно нулю (1–0,5; 2–0,3; 3–0; 4–0).

Рисунок представлен исключительно в редакции автора.

Как видно на рис. 1 и 2, при наличии задержек между лучами (наличие многолучевости) коэффициент корреляции падает с единицы (рис. 1) до 0,3 (рис. 2). Поэтому можно сделать вывод, что многолучевость распространения приводит к раскорреляции сигнала. Величина функции взаимной корреляции сигналов, пришедших в точку приема по различным лучам, зависит от разности времени распространения сигналов, полосы частот исходного сигнала, расстояния между источником и приемником [5]. Как показано в [6] пространственный интервал интерференционных осцилляций зависит от усреднения сигнала, как по времени, так и по пространству. Поэтому для сглаживания интерференции и повышения коэффициента корреляции возможно использование вертикально распределенной антенны. С использованием распределенных в вертикальной плоскости линеек гидрофонов и одиночных гидрофонов были проведены экспериментальные исследования в гидроакустическом бассейне. Методика проведения эксперимента в гидроакустическом бассейне предполагала установку уровня тонального сигнала таким образом, чтобы он регистрировался на измерительном гидрофоне и не регистрировался на опорном гидрофоне, который располагался на определённом расстоянии от измерительного гидрофона. На опорном гидрофоне формировалась только помеха, создаваемая с помощью излучения в воду широкополосного помехового сигнала.

Для оценки возможности компенсации помех с использованием адаптивного фильтра с использованием одиночных и распределенных в вертикальной плоскости антенной решетки были проведены экспериментальные исследования в гидроакустическом бассейне по схеме, представленной на рис. 3.

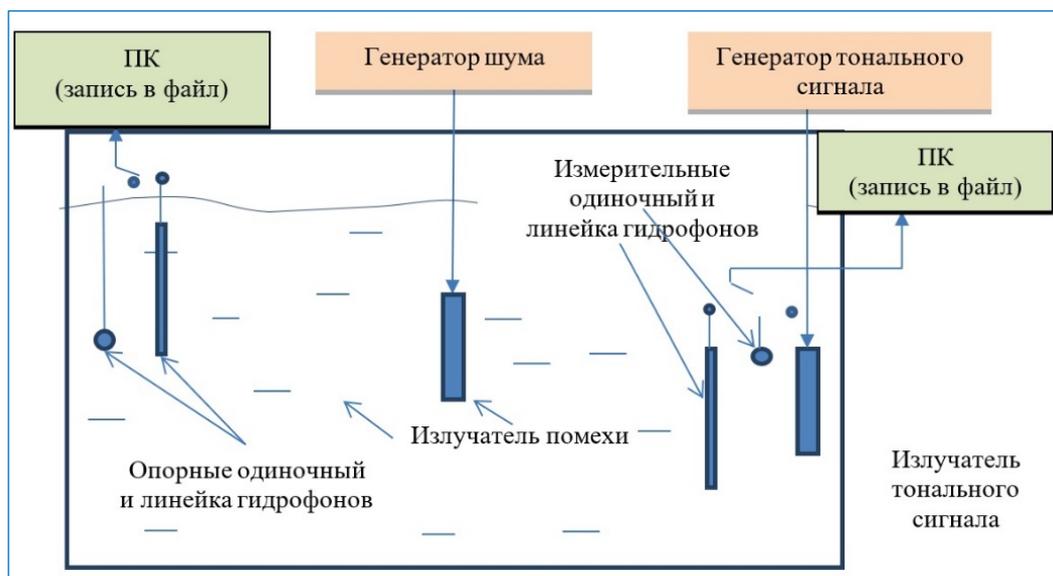


Рис. 3. Схема проведения эксперимента в гидроакустическом бассейне.

На рис. 4 показаны измеренные коэффициенты взаимной корреляции между сигналами с выхода измерительной и опорной линейки гидрофонов, распределенных в вертикальной плоскости и на выходе измерительного и опорного одиночных гидрофонов. Для сравнения величины коэффициента взаимной корреляции произведены измерения для распределенных и точечных гидрофонов в полосе 6700–10800 Гц. Спектры на выходе схемы адаптивной обработки сигнала с использованием одиночного ненаправленного гидрофона и распределенной в вертикальной плоскости линейки гидрофонов показаны на рис. 5.

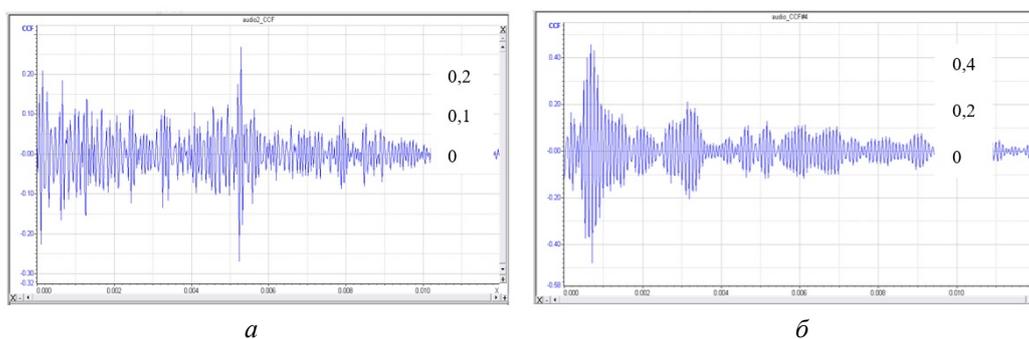


Рис. 4. Коэффициент взаимной корреляции на выходе одиночных гидрофонов (а) и распределенных в вертикальной плоскости линейки гидрофонов (б).

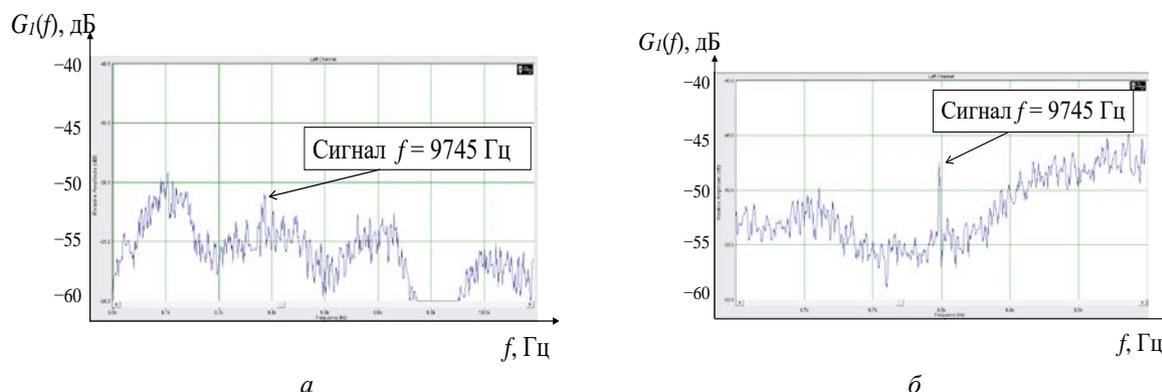


Рис. 5. Спектр на выходе схемы адаптивной обработки сигнала с использованием одиночного ненаправленного гидрофона (а) и распределенной в вертикальной плоскости линейки гидрофонов (б).

Как видно из рис. 4, уровень тонального сигнала после обработки в адаптивном компенсаторе помех с использованием распределенной линейки гидрофонов больше на 6–7 дБ, чем после адаптивной компенсации помех с выхода одиночных гидрофонов.

Следует отметить, что этот результат справедлив для определенного соотношения размеров антенной решетки и длины излученного сигнала. Положительный эффект будет наблюдаться в том диапазоне частот, где волновой размер антенной решетки будет больше единицы.

Таким образом, можно сделать вывод, что в условиях многолучевости использование распределенных в пространстве линеек гидрофонов дает больший коэффициент пространственной взаимной корреляции по сравнению с одиночными гидрофонами. Как следствие этого, использование вертикальных линеек измерительных и опорных гидрофонов при реализации адаптивного компенсатора помех на основе винеровской фильтрации повышает помехоустойчивость средств измерения помех путем подавления коррелированной составляющей помехи по сравнению с использованием одиночных гидрофонов в адаптивном компенсаторе помех.

#### *Литература*

1. Колмогоров В. С., Викторов Р. В., Дягилев М. В., Пономарев М. О., Шпак С. А. Помехоустойчивость гидроакустических систем при использовании адаптивной обработки сигналов. Владивосток: ТОВВМУ, 2015. 196 с.
2. Патент РФ № 2659186 от 28.06.2018. Способ регистрации уровня шумоизлучения морского объекта / В. С. Колмогоров, А. В. Крупеньков, С. А. Шпак.
3. Уидроу Б., Стинрз С. Адаптивная обработка сигналов / Пер с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
4. Джиган В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / Техносфера. М.: 2013. 527 с.
5. Долгих В. Н. Статистическая гидроакустика. Владивосток: ТОВМИ, 2003. 200 с.
6. Орлов Е. Ф., Шаронов Интерференция звуковых волн в океане. Владивосток: Дальнаука, 1998. 196 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО НЕОДНОРОДНЫМ ТРАССАМ

А. Р. Агишев, В. Н. Линник, А. А. Скорынин, канд. физ.-мат. наук  
АО «Корпорация «Комета», Москва, Россия

## DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS FOR HYDROACOUSTIC SIGNALS DISTRIBUTION CALCULATIONS IN RANGE-DEPENDENT ENVIRONMENTS

A. R. Agishev, V. N. Linnik, A. A. Skorynin, Ph.D.  
JSC «Corporation «Kometa», Moscow, Russia

*При проведении гидроакустических расчетов по неоднородным по дальности трассам с помощью модового подхода используется метод поперечных сечений. Суть его заключается в приближении неоднородной трассы конечным набором однородных по дальности участков с дополнительными условиями на границах каждого участка. При расчетах сложных трасс количество участков существенным образом влияет на длительность и точность расчета. В работе приведен анализ этого влияния и предложен критерий выбора оптимального разбиения неоднородной трассы.*

*Cross-section method is applied for hydroacoustic calculations in range-dependent environments using mode approach. This method consists in dividing range-dependent environment into a finite number of range-independent sections with additional boundary conditions for each section. For complex range-dependent environments the number of sections extremely influences on duration and accuracy of calculation. The article analyzes influence of the number of sections on the calculation error; criterion of optimal dividing choice for range-dependent environment is suggested.*

**Введение.** Одним из методов расчета акустического поля в условиях неоднородных по глубине и дальности трасс для низкочастотных сигналов является метод нормальных мод [1]. Он позволяет детально учесть гидро- и геофизические характеристики среды по трассе, а именно, неоднородности скорости звука, плотности, объемного затухания среды, наличие донных осадков, льда.

В случае наличия неоднородностей вдоль трассы она разбивается на несколько однородных по дальности сегментов. Проводится шивка поля методом поперечных сечений (coupled modes) [1]. Непрерывность поля на границе обеспечивается граничными условиями вида:

$$P(r, z)|_{r_{j-0}} = P(r, z)|_{r_{j+0}}; \tag{1}$$

$$\frac{1}{\rho(r, z)} \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} \Big|_{r_{j-0}} = \frac{1}{\rho(r, z)} \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} \Big|_{r_{j+0}},$$

где  $P(r, z)$  — акустическое давление на расстоянии  $r$  от источника, на глубине  $z$ ;  $\rho(r, z)$  — плотность среды;  $r_{j-0}, r_{j+0}$  — граница  $j$ -го сегмента трассы.

Граница каждого сегмента определяется алгоритмом трассопостроителя. В ходе работы такого алгоритма реальный батиметрический профиль трассы аппроксимируется суммой кусочно-постоянных функций. Пример такой аппроксимации показан на рис. 1.

В работе рассмотрен алгоритм трассопостроителя, который заключается в минимизации квадратов невязок глубины между реальными значениям глубины и ее аппроксимацией кусочно-постоянными функциями. Алгоритм работает итерационно, разбивая на каждой итерации один из сегментов на два. При этом сегмент и место разбиения выбирается так, что обеспечивается минимум суммы квадратов невязок аппроксимации.

В докладе рассматривается влияние детализации разбиения трассы на точность проведения гидроакустических расчетов.

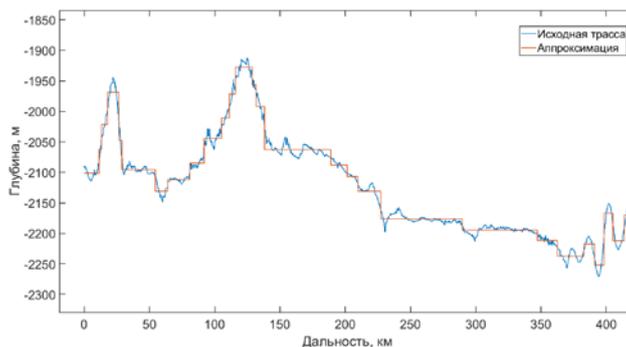


Рис. 1. Пример аппроксимации реального батиметрического профиля трассы ступенчатой функцией.

**Критерий выбора оптимального разбиения неоднородной трассы.** Результатом работы алгоритма, аппроксимирующего батиметрический профиль кусочно-постоянными функциями методом наименьших квадратов с  $N$  сегментами, является разбиение трассы  ${}^N U(r)$  вида:

$${}^N U(r) = \sum_{n=0}^{N-1} U_n(r); \quad (2)$$

$$U_n(r) = \begin{cases} u_n, & \text{при } r_n \leq r < r_{n+1}, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $r_n, r_{n+1}$  — границы  $n$ -го сегмента;  $u_n$  — глубина  $n$ -го сегмента в метрах. Количество сегментов на выходе алгоритма трассопостроителя  $N$  определяется настроечными параметрами алгоритма.

С ростом количества сегментов  $N$  для заданной трассы величина невязок глубины снижается. Однако это влечет практически пропорциональное увеличение времени расчета. Для того, чтобы уменьшить количество сегментов  $N$ , сохранив при этом высокую точность аппроксимации в алгоритм вводится некоторая функция  $C = f(N)$ , называемая ценой разбиения трассы на  $N$  сегментов. Цена разбиения должна иметь глобальный минимум и учитывать погрешность и время проведения расчетов уровня сигнала. Алгоритм трассопостроителя выбирает такое разбиение, которое соответствует минимуму функции цены. Требуется найти такую функцию цены  $C = f(N)$ , которая обеспечит минимальное количество сегментов  $N$  (следовательно, минимальное время расчета) при заданной величине невязок гидроакустического сигнала. При этом количество сегментов не должно превышать максимальное значение. Формальный критерий выбора функции цены может быть записан в виде

$$\begin{aligned} & \min_C N; \\ & \begin{cases} \delta < \hat{\delta} \\ N < \hat{N} \end{cases}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\hat{\delta}$  — максимально допустимый уровень невязок сигнала  $\delta = 20 \lg(A/\hat{A})$  — уровень невязок сигнала при разбиении поля на  $N$  сегментов относительно эталона;  $A$  — значение уровня сигнала по результатам расчетов;  $\hat{A}$  — уровень сигнала эталонный;  $\hat{N}$  — максимальное количество сегментов для одной трассы;  $C$  — множество функций цены трассопостроителя. Уровень невязок сигнала  $\delta$  может оцениваться как максимальное значение невязок сигнала для интересующей части трассы. За эталон уровня сигнала при определении  $\hat{\delta}$  выбирается уровень сигнала, соответствующий детальному разбиению трассы с большим числом сегментов. Максимальное значение сегментов разбиения трассы  $\hat{N}$  выбирается исходя из оценок максимально допустимого времени проведения расчета.

Решение задачи (4) ищется не для какого-либо отдельного расчета, а для наборов схожих по условиям трасс, например: для условий глубокого моря, мелкого моря и переходных трасс. Решением задачи является набор функций цены разбиения  $C$ , который будет использоваться в алгоритме трассопостроителя по умолчанию для выбранного типа трасс.

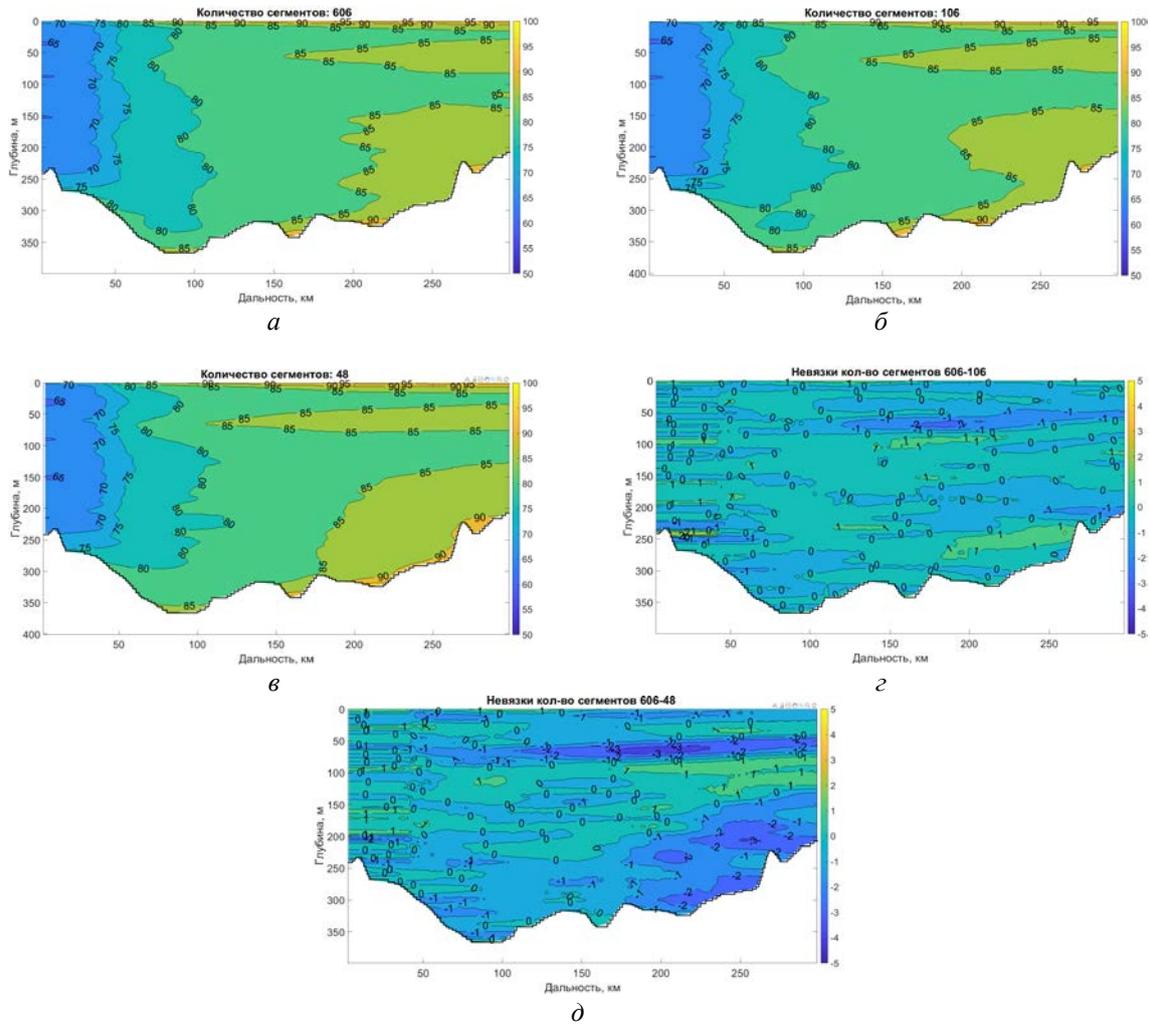


Рис. 2. Проведение поиска функции цены трассопостроителя для условий мелкого моря.

*a–в* — потери при распространении, дБ; *г–д* — невязки потерь при распространении, дБ.

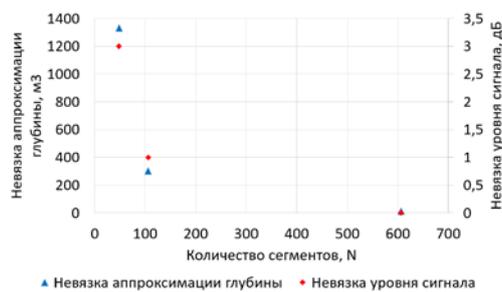


Рис. 3. Зависимости невязок глубины  $\Delta$  и невязок уровня сигнала  $\delta$  от  $N$ .

**Результаты расчетов.** На рис. 2 показан пример расчетов для условий мелкого моря. Проведено несколько расчетов для разных настроек трассопостроителя: для 606, 106 и 48 сегментов вдоль трассы. Гидроакустические расчеты проводились в ПО KrakenC [2]. На рис. 2, *a–в* показаны распределения потерь при распространении. На рис. 2, *г* — невязка сигнала между расчетами с 606 и 106 сегментами, на рис. 2, *д* — невязка между расчетами с 606 и 48 сегментами. Уровень невязок на рис. 2, *г* составляет 0–1 дБ, на рис. 2, *д* — 1–3 дБ. Такие значения невязок считаются допустимыми [3]. Таким образом для рассмотренной трассы

функция цены должна иметь минимум в районе значения  $N$  порядка 50. Поскольку оценку погрешности расчетов уровня сигнала является вычислительно сложной задачей, то вместо неё в качестве приближенной оценки может быть рассмотрена величина невязки глубины  ${}^N\Delta$ . Примером функции цены может служить функция  $C$ :

$$C = f(N, {}^N\Delta); \quad (5)$$

$${}^N\Delta = \int_0^R [H(r) - {}^N U(r)]^2 dr, \quad (6)$$

где  ${}^N\Delta$  — величина невязок глубины при аппроксимации трассы кусочной функцией  ${}^N U(r)$  с  $N$  сегментами;  $H(r)$  — глубина трассы в метрах;  $R$  — длина трассы в километрах.

На рис. 3 представлены зависимости невязок глубины  ${}^N\Delta$  и невязок уровня сигнала  $\delta$  от  $N$  которые демонстрирует некоторое подобие. Конкретный вид функции  $C = f(N, {}^N\Delta)$  предлагается определить по результатам проведения статистического моделирования по наборам трасс для условий глубокого моря, мелкого моря и переходных трасс.

**Заключение.** В работе проведен анализ влияния точности аппроксимации батиметрического профиля кусочно-постоянными функциями на результаты расчетов распространения звука на трассах, неоднородных по дальности и глубине. Предложен критерий выбора оптимального разбиения трассы. Настройка трассопостроителя по предложенному в докладе критерию должна существенно сократить вычислительное время при проведении гидроакустических расчетов, сохранив при этом заданные уровень точности этих расчетов.

#### *Литература*

1. Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H. Computational ocean acoustics // Springer. New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2011.794 p.
2. Acoustic Toolbox [Электронный ресурс] // Acoustic Toolbox: [сайт]. URL: [www.oalib.hlsresearch.com](http://www.oalib.hlsresearch.com) (дата обращения: 10.04.2022).
3. Kusel E. T., Siderius M. Comparison of Propagation Models for the Characterization of Sound Pressure Fields // IEEE J. of Oceanic Engineering, 2019.

## ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ В МЕЛКОМ МОРЕ

*В. Г. Бурдуковская, М. А. Раевский*, канд. физ.-мат. наук  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

## INFLUENCE OF WIND WAVES AND DYNAMIC NOISE ON CHARACTERISTICS OF HORIZONTAL ARRAY IN THE SHALLOW SEA

*V. G. Burdukovskaya, M. A. Raevsky*, Ph.D.  
Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

*Исследуется влияние корреляционных характеристик шума, генерируемого ветровыми источниками, на эффективность пространственной обработки сигналов, принимаемых горизонтальной антенной решеткой в океанических волноводах со взволнованной поверхностью. Проанализирован коэффициент усиления антенны при различных способах пространственной обработки сигнала. Приведены результаты численного моделирования для гидрологических условий Баренцева моря в зимний период. Проводится сравнение коэффициентов усиления антенны, рассчитанных с использованием модели ветрового шума и традиционной модели шума, некоррелированного на ее элементах.*

*The influence of correlation characteristics of noise generated by wind sources on the efficiency of spatial processing of signals received by a horizontal array in oceanic waveguides with a rough surface is studied. Array gain is analyzed for various methods of spatial signal processing. The results of numerical modeling for the hydrological conditions of the Barents Sea in winter are presented. The array gain calculated using the wind noise model and the traditional noise model uncorrelated on its elements are compared.*

Для прикладных задач акустики океана актуально рассмотрение эффективности алгоритмов обработки слабых акустических сигналов на фоне помех с использованием протяженных антенных решеток (АР). Оптимальные алгоритмы обработки частично когерентных сигналов хорошо известны и требуют лишь адекватных (для конкретных условий распространения звука) моделей корреляционных матриц сигнала и шума на апертуре антенны. Таким образом, для оценки эффективности обнаружения акустических сигналов необходимы теоретические модели сигналов и помех в мелком море, учитывающие не только регулярные характеристики волновода, но и эффекты многократного рассеяния акустического поля на ветровом волнении и случайных внутренних волнах. Результаты подобных исследований приведены в работах [1–3], где рассматривалось влияние ветрового волнения на характеристики горизонтальной антенны. Следует при этом заметить, что в этих работах использовалась в качестве помехи максимально простая модель шума, некоррелированного на элементах АР. Вместе с тем для океанического шума ветрового происхождения (динамического шума) была разработана теоретическая модель для корреляционной матрицы шума на апертуре горизонтальной АР, которая учитывает не только генерацию его дипольными источниками, но и эффекты многократного рассеяния на взволнованной морской поверхности [4].

Для сигнала и шума будем использовать модовое представление акустического поля. Функция пространственной когерентности сигнала, усредненная по интерференционной структуре акустического поля, определяется автокорреляционной функцией модовых амплитуд  $a_n$  с поперечным разнесением  $\rho$  точек наблюдения  $N_n(\rho, x) = \langle a_n(-\frac{\rho}{2}, x) a_n^*(\frac{\rho}{2}, x) \rangle$ .

В случае ненаправленного (в горизонтальной плоскости) источника и изотропного ветрового волнения уравнение переноса для корреляционной функции сигнала имеет вид [5]:

$$\frac{\partial N_n(\rho, x)}{\partial x} = \sum_m W_{mn}(\rho, x) N_m(\rho, x) - 2(\gamma_n + |\text{Im } k_n|) N_n(\rho, x). \quad (1)$$

Здесь  $W_{mn}$  — вероятность перехода между модами;  $\gamma_n$  — декремент затухания когерентной компоненты  $\langle a_n \rangle$ ;  $\text{Im } k_n$  — мнимая часть волнового числа, обусловленная потерями энергии в среде распространения. В свою очередь, функции  $W_{mn}$  и  $\gamma_n$  выражаются через частотный спектр

изотропного ветрового волнения [3]. Для частотного спектра развитого волнения при численном моделировании будет использоваться эмпирический спектр JONSWAP [6].

Аналогичным образом поле динамического шума представим в виде разложения по собственным функциям волновода. Вычисление пространственной функции корреляции модовых амплитуд  $R_n(\rho)$  в силу изотропности шума сводится к вычислению их интенсивности  $I_n = R_n(0)$ , а именно:

$$R_n(\rho) = I_n J_0(k_n \rho), \quad (2)$$

где  $J_0(x)$  — функция Бесселя нулевого порядка. Для интенсивности  $I_n$  мод шумового поля, возбуждаемого равномерно распределенными источниками дипольного типа, имеем [4] уравнение:

$$\sum_m \tilde{W}_{mn} I_m - 2(\gamma_n + |\text{Im } k_n|) I_n + Q_n = 0, \quad (3)$$

где  $\tilde{W}_{mn} \equiv W_{mn}(\rho = 0)$ . Функция  $Q_n$  соответствует дипольным источникам шума и выражается через пространственный спектр дипольного момента давления на свободной поверхности [4].

Перейдем далее к анализу характеристик приемной АР в зависимости от выбранного метода обработки сигнала на фоне динамического шума. Будем считать, что АР состоим из  $M$  эквидистантных элементов, расположенных в горизонтальной плоскости на глубине  $z_A$ . Для межэлементного расстояния  $d$  будем использовать стандартное значение, равное половине длины волны на частоте  $f_0$ . Основными характеристиками сигнала и шума, используемыми при пространственной обработке, являются их корреляционные матрицы размерности  $(M \times M)$ , которые очевидным образом выражаются через функцию  $N_n(\rho, x)$  и  $R_n(\rho)$  [3]. В дальнейшем будем использовать нормированные матрицы сигнала и шума, которые обозначим, соответственно,  $\mathbf{N}$  и  $\mathbf{R}$ .

Для количественной оценки эффективности пространственной обработки сигналов выберем коэффициент усиления антенны  $G$ , который стандартно определяется как величина выходного отношения сигнал/шум (ОСШ), отнесенная к величине ОСШ на отдельном приемном элементе. Естественно, величина  $G$  зависит не только от вида корреляционных матриц сигнала и помехи (в нашем случае ветрового шума), но и метода пространственной обработки. В целях сравнительного анализа мы рассмотрим три известных метода пространственной обработки: 1 — стандартный метод ФАР, компенсированной в направлении на источник сигнала (соответствующий коэффициент усиления обозначим  $G_0$ ), 2 — метод оптимальной линейной обработки (коэффициент усиления обозначим  $G_1$ ), 3 — метод оптимальной квадратичной обработки (коэффициент усиления обозначим  $G_2$ ). Для коэффициента усиления  $G_0$  имеем выражение

$$G_0 = \frac{\sum_m \sum_n N_{mn}(r)}{\sum_{mn} R_{mn}}. \quad (4)$$

Коэффициенты усиления  $G_1$  и  $G_2$  оптимальной обработки выражаются через собственные значения матрицы  $\mathbf{S} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{N}$ , что соответствует дополнительной операции пространственной декорреляции («выбеливания») шума. Соответствующие выражения имеют вид:

$$G_1 = \lambda_1, \quad G_2 = [\sum_i \lambda_i^2]^{1/2}, \quad (5)$$

где  $\lambda_i$  — собственные значения матрицы  $\mathbf{S}$ , пронумерованные в порядке их убывания ( $\lambda_1$  — максимальное из них). В дальнейшем для сравнения будут приводиться и результаты вычисления коэффициентов усиления на фоне некоррелированного шума. В этом случае матрица шума  $\mathbf{R}$  является единичной,  $\sum_{mn} R_{mn} = M$  и в формулах (5) фигурируют собственные значения матрицы сигнала  $\mathbf{N}$ .

Рассмотрим численное моделирование коэффициентов усиления антенны  $G_i$  для мелководного звукового канала со слабым положительным градиентом скорости звука, что, например, типично для Баренцева моря в зимний период. При этом для волновода с линейным

профилем  $c(z)$  выбраны следующие параметры:  $c(0)=1490$  м/с,  $c(H)=1500$  м/с, глубина дна  $H=200$  м. В качестве модели дна рассматривается жидкое полупространство со скоростью звука  $c_l = 1800$  м/с, плотностью  $\rho_0=2$  г/см<sup>3</sup> и коэффициентом затухания  $\delta=0,2$  дБ/км·Гц. Предполагается, что источник с частотой излучения  $f_0= 250$  Гц расположен на глубине  $z_{и}=100$  м. Горизонтальная АР с числом элементов  $M = 51$  и межэлементным расстоянием  $d=\lambda/2=3$  м расположена вблизи дна на глубине  $z_A = 197$  м. При этом рассматривается антенна, ориентированная перпендикулярно к источнику. Расчеты проводились для скоростей ветра  $V=10$  м/с и  $V=15$  м/с, то есть, согласно принятой терминологии, для умеренного и сильного ветрового волнения. Чтобы продемонстрировать специфику обнаружения сигнала на фоне ветрового шума, ниже будут приводиться, для сравнения, и результаты расчетов коэффициентов усиления  $G_i$  для тех же условий распространения сигнала, но на фоне некоррелированного шума. На рис. 1 приведены зависимости от расстояния  $r$  коэффициентов усиления  $G_0$ ,  $G_1$  и  $G_2$  при поперечной ориентации АР для умеренного и сильного ветрового волнения. Здесь же, для сравнения, приводятся и аналогичные зависимости для традиционной модели некоррелированного шума.

Нетрудно видеть, что коэффициенты усиления  $G_i$ , полученные в рамках модели ветрового океанического шума существенно больше (приблизительно на 2 дБ), чем аналогичные коэффициенты усиления сигнала на фоне некоррелированного шума (при этом модель сигнала и в тех и других расчетах одна и та же). На малом удалении антенны от источника  $r \approx 0$ , когда сигнал на апертуре полностью когерентен, коэффициенты усиления  $G_i = 51$  (17 дБ), то есть равны числу приемных элементов АР для модели некоррелированного шума, но для модели динамического шума имеют значения  $G_i \approx 77$  (19 дБ), что значительно превышает значение  $M$ .

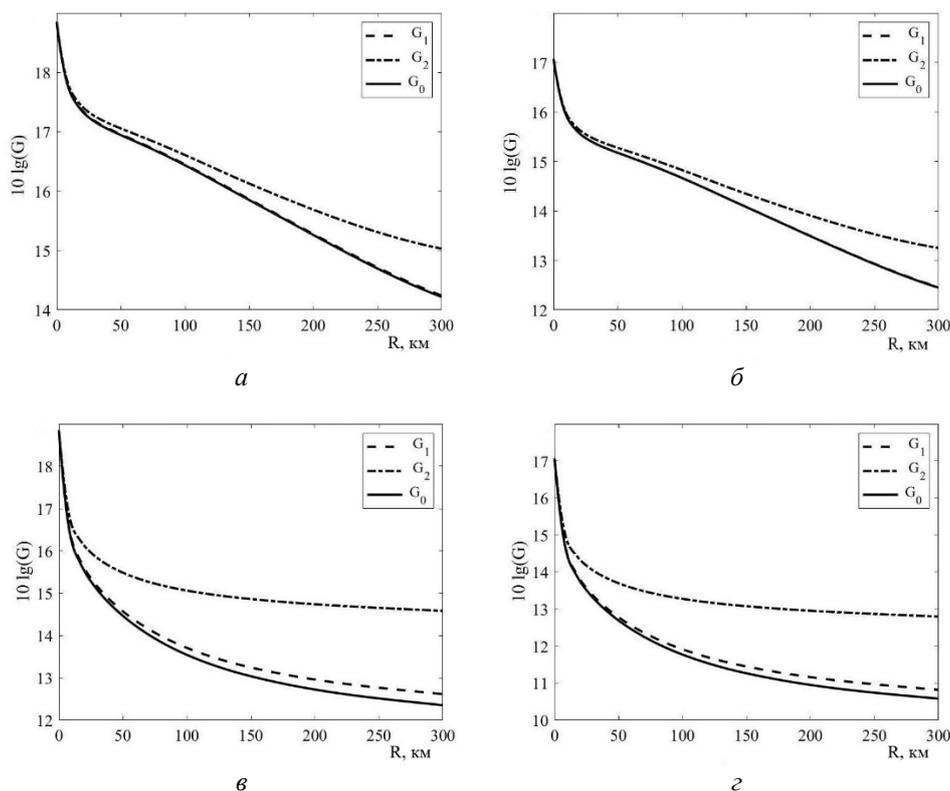


Рис. 1. Коэффициенты усиления  $G_i$  в мелком море для двух моделей шума при поперечной ориентации АР.

$a$  — динамический шум,  $V = 10$  м/с;  $б$  — некоррелированный шум,  $V = 10$  м/с;  
 $в$  — динамический шум,  $V = 15$  м/с;  $г$  — некоррелированный шум,  $V = 15$  м/с.

Этот результат может показаться неожиданным, поскольку традиционно считается, что наличие межэлементных корреляций шума снижает коэффициент усиления  $AP$ , а значение коэффициента усиления равное  $M$  является максимально возможным. Объяснение приведенных на рис. 1, а, в результатов связано со специфическим видом корреляционной функции ветрового шума, а именно ее знакопеременным спаданием по  $\rho$  и расположением ее нулей. Наиболее наглядно это можно пояснить на примере коэффициента усиления  $G_0$ . Учитывая когерентность сигнала при  $r \approx 0$  и нормировку матричных элементов  $N_{mn}$  и  $R_{mn}$  для  $G_0$  при  $\beta_A=0$  из формулы (4), следует:

$$G_0 = \frac{M^2}{M + \sum_m \sum_{n \neq m} R_{mn}}, \quad (6)$$

где, для наглядности, выделен вклад межэлементных корреляций шума. В случае некоррелированного шума отсюда получаем  $G_0=M$ , в случае монотонного спада значения коэффициента корреляции шума отсюда следовало бы, что  $G_0 < M$ , но для ветрового шума расчеты показывают, что сумма межэлементных коэффициентов корреляции является отрицательной и вследствие этого значение  $G_0 > M$ .

При увеличении расстояния от источника до антенны из-за эффектов многократного рассеяния на ветровом волнении увеличивается декорреляция сигнала на апертуре  $AP$ , вследствие чего коэффициенты усиления  $G_i$  монотонно уменьшаются. При этом значения  $G_1$  и  $G_0$  практически совпадают и уменьшаются на  $4 \div 5$  дБ при умеренном волнении и на  $6 \div 7$  дБ при сильном ветре. Коэффициент усиления при оптимальной квадратичной обработке  $G_2$  спадает более медленно, поскольку эффективность ее в сравнении с оптимальной линейной растет с увеличением декорреляции сигнала. При  $V=10$  м/с этот выигрыш не столь значим и не превышает одного децибела, но при  $V=15$  м/с разница значений  $G_2$  и  $G_1$  достигает 3 дБ, что существенно для задач выделения слабых сигналов на фоне помех. Следует также отметить, что качественный характер зависимости от дистанции коэффициентов усиления для двух моделей шума примерно одинаков, но значения  $G_i$  для модели динамического шума приблизительно на 2 дБ превышает аналогичные значения, полученные для модели некоррелированного шума и той же модели сигнала. Интересно отметить, что этот эффект наблюдается и для антенны, ориентированной под углом к направлению на источник.

### *Литература*

1. Городецкая Е. Ю., Малеханов А. И., Сазонтов А. Г., Фарфель В. А. Влияние эффектов дальнего распространения звука в случайно-неоднородном океане на потери усиления горизонтальной антенной решетки // Акуст. жур. 1996. Т. 42, № 5. С. 615–622.
2. Завольский Н. А., Малеханов А. И., Раевский М. А. Сравнительный анализ методов пространственной обработки сигналов, принимаемых горизонтальной антенной решеткой в канале мелкого моря со взволнованной поверхностью // Акуст. жур. 2019. Т. 65, № 5. С. 608–618.
3. Бурдуковская В. Г., Малеханов А. И., Раевский М. А. Влияние анизотропного ветрового волнения на эффективность пространственной обработки акустических сигналов в мелком море // Акуст. жур. 2021. Т. 67, № 6. С. 617–625.
4. Раевский М. А., Бурдуковская В. Г. Многократное рассеяние океанического шума на ветровом волнении в мелком море // Акуст. жур. 2021. Т. 67, № 5. С. 514–520.
5. Горская Н. С., Раевский М. А. О многократном рассеянии низкочастотных акустических волн на поверхностном волнении // Акуст. жур. 1986. Т. 32, № 2. С. 165–171.
6. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в Мировом океане. Л.: Гидрометеоздат. 1985. 256 с.

Данное исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 20-19-00383.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В СРЕДНЕМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

*A. B. Ермошкин*, канд. физ.-мат. наук, *И. А. Капустин*, канд. физ.-мат. наук, *Д. А. Костеев*,  
*А. А. Мольков*, канд. физ.-мат. наук, *А. А. Пономаренко*, канд. техн. наук, *Д. Д. Разумов*,  
*М. Б. Салин*, канд. физ.-мат. наук

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

## ESTIMATION OF SURFACE WAVE CONDITION BASED ON LONG-RANGE ACOUSTIC BACKSCATTERING IN A KILOHERTZ RANGE

*A. V. Ermoshkin*, Ph.D., *I. A. Kapustin*, Ph.D., *D. A. Kosteev*, *A. A. Molkov*, Ph.D., *A. A. Ponomarenko*, Ph.D.,  
*D. D. Razumov*, *M. B. Salin*, Ph.D.

Institute of Applied Physics, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

*В ходе двухнедельного эксперимента по дистанционному зондированию моря и измерениями контактными средствами на океанографической платформе на северном шельфе Черного моря излучались тональные импульсы среднего диапазона частот 1-3 кГц и измерялись характеристики волнения с помощью волнографического буя. Изучались особенности Доплеровского спектра обратного рассеяния звука в зависимости от состояния моря. С помощью алгоритма, основанного на решающих деревьях и метода повышения градиента, была натренирована модель, способная предсказывать значимую высоту и направление волн по признакам спектра обратного рассеяния.*

*During two-week sea experiment on sea remote sensing and measurements using touch trigger probing technique on oceanographic platform located on the northern Black Sea shelf 1-3 kHz tonal pulses were emitted and heaving characteristics were measured using wave recorder buoy. Features of acoustic backscattering Doppler spectrum were studied depending on sea state. Decision-tree-based algorithm and gradient increasing method were used for training the model for prediction significant wave height and wave direction using backscattering spectrum features.*

**Введение.** Наблюдение и прогнозирование морских течений и ветрового волнения необходимо для безопасности судоходства, работы в портах и на морских платформах. Большое число задач дистанционного зондирования моря решается при помощи радаров [1], но акустические средства также важны. Донные автономные системы могут работать в сложных условиях, таких как шторм или наличие дрейфующего льда. Помимо локальных высокочастотных приборов, таких как современные акустические доплеровские измерители течений [2] и подводные приборы с направленным вверх излучением [3], интерес представляют системы для оценки волн и течений на большом расстоянии. Авторы разрабатывают метод определения состояния поверхности моря по амплитудно-фазовым характеристикам рассеянного сигнала вне участка прямой засветки поверхности. С помощью данного метода гидролокатор низкого и среднего диапазона частот можно будет использовать по аналогии с метеорологическим радаром для обзора состояния моря вокруг платформ и судов. Был проведен эксперимент [4] для проверки модели, положенной в основу. Нельзя не отметить, что обычно задача прогнозирования распределения сигнала реверберации по частотам Доплера для звука в диапазоне 1–3 кГц решается в прямой постановке и имеет практическую значимость для оценки дальности работы гидролокатора [5]. Настоящее исследование посвящено обратной задаче прогнозирования состояния морской поверхности по сигналу обратного рассеяния.

**Описание эксперимента.** Эксперимент проходил на океанографической платформе в шельфовой зоне северной части Черного моря во второй половине сентября 2021 г. Платформа располагалась в 600 м от берега, глубина около платформы 30 м, мористее на 2 морские мили глубина шельфа достигает 80 м. Профиль скорости звука, большую часть времени эксперимента был равномерным. Контактные измерения на платформе и дистанционное зондирование моря проводились одновременно различными типами датчиков. Подводный акустический эксперимент проводился по классической моностатической схеме. Приёмник — горизонтальная линейка гидрофонов с шагом 0,2 м располагался на глубине 13 м (рис. 1, а). Эффективное число датчиков — 13 шт. Рядом с приёмником, глубже на 5 м, располагался всенаправленный керамический излучатель кольцевого типа. Создаваемое акустическое давление составляло около 1 кПа на расстоянии 1 м.

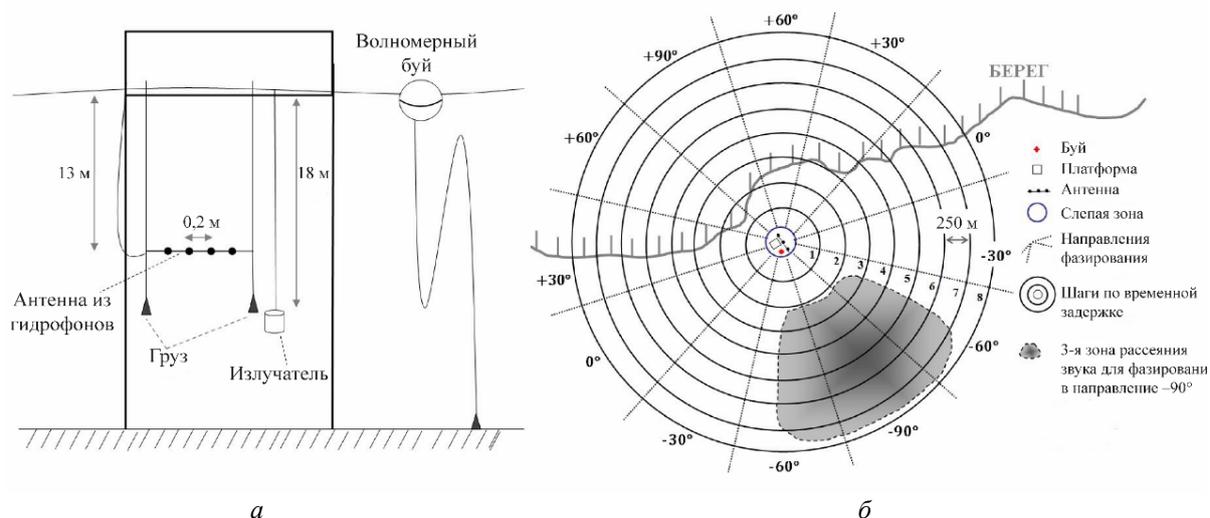


Рис. 1. Схема эксперимента.

*a* — в вертикальной плоскости; *б* — в горизонтальной.

Выходная мощность была ограничена по экологическим причинам. Излучались длительные тональные импульсы с периодом следования 90 с и длительностью 2 с при частоте заполнения 1320, 2020, 2720 Гц и длительностью 8 с на частоте 2080 Гц. Видно, что несущие частоты звука соответствовали рассеянию поверхностными волнами в дециметровом диапазоне длин волн. Для изучения поверхностных волн использовался волномерный буй Datawell DWR-G4, расположенный вблизи платформы. Алгоритм обработки данных буя выдавал в числе прочего следующие величины:  $H_{m0}$  — значимая высота волны,  $T_z$  — период спектрального пика,  $Dirp$  — направление наиболее интенсивных волн. Буй регистрировал эти волновые характеристики каждые 30 мин, всего было проведено порядка 400 измерений.

**Обработка сигнала.** Исходный сигнал с гидрофона снимался с частотой дискретизации 24 кГц. Далее производилось гетеродинирование на 4-х несущих частотах — вычислялась временная зависимость комплексной огибающей с частотой дискретизации 50 Гц. Затем формировалась диаграмма направленности путем домножения сигнала с 13 гидрофонов на фазовые множители и суммирования, направления фазирования от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  с шагом  $30^\circ$ . Для каждого направления вычислялась спектрограмма сигнала, выполнялось оконное преобразование Фурье, длина окна — 64 отсчёта, перекрытие окон 75 %. Определялся момент начала каждого импульса, чтобы затем сохранить только сам импульс и несколько секунд реверберации после него. Примерная сетка фазирования и стробирования по времени изображена на рис. 1, *б*. Для направлений не вдоль антенны имеется неоднозначность по углу. Зона рассеяния изображена для импульса длительностью 2 с. Таким образом, для каждой несущей частоты была найдена спектральная плотность мощности звукового сигнала  $СПМ(\tau, \Delta f, n, \theta)$  в зависимости от  $\tau$  — временной задержки,  $\Delta f$  — частоты Доплера,  $n$  — номера импульса и  $\theta$  — угла фазирования. Чтобы получить набор данных, размерность которых соответствует числу измерений, выполняются дальнейшие преобразования.

Во-первых, делается усреднение по импульсам, число импульсов в усреднении  $\sim 20$ , что соответствует временному шагу в 30 мин  $\langle СПМ(\tau, \Delta f, n, \theta) \rangle_n$ . Плохие импульсы, где эхо-сигнал искажен шумом, из усреднения исключаются. В дневные часы особенно заметен широкополосный шум от моторных лодок, кораблей и работы лебедки на платформе, он исключается на основании гистограммного критерия: импульс исключается из усреднения, если на спектрограмме имеется более 5 % процентов точек, превосходящих пороговое значение в области, где задержка  $\tau$  соответствует времени реверберации и доплеровский сдвиг частоты  $\Delta f$  превышает характерное для реверберации значение.

Во-вторых, частотная зависимость преобразуется в так называемые признаки. Спектрограмма сводится к зависимости этих признаков от угла и задержки. Из-за ограничения на объем данной публикации читателям предлагается обратиться за подробностями к [4].

Пример усредненной спектрограммы реверберации показан на рис. 2, а. Красная зона, расположенная на графике от  $-3,3$  до  $0$  с, представляет собой период насыщения, когда в окно Фурье анализа попадает исходный импульс. Анализируется спектрограмма для моментов времени, начиная от  $0$  с, когда в окно анализа попадает только сигнал реверберации. На рис. 2, б изображена частотная зависимость сигнала реверберации для минимальной задержки  $0,335$  с. В ходе эксперимента проводилась калибровка акустической трассы, был измерен уровень сигнала на различных расстояниях от платформы и определены потери на распространение, они соответствовали распространению звука в мелком море. Исходя из уровня излучения и ширины диаграммы направленности, сигнал реверберации был нормирован так, чтобы представлять силу поверхностного рассеяния (в обратном направлении). Экспериментальная кривая на рис. 2, б сравнивается с модельными. Сплошная кривая — предположительно донное рассеяние. Далее, в работе [6] в приближении метода малых возмущений (ММВ) проводился расчёт спектра реверберации от взволнованной поверхности, соответствующие этой модели линии нанесены на рис. 2, б. Штриховая линия — брэгговское рассеяние, учитывающее некоторое уширение дисперсионной кривой поверхностных волн, точечная линия — обнаруженная ранее по анализу видеоизображения сплошная часть  $k$ - $\omega$  спектра, которая теперь обнаружена и в спектре рассеяния. Однако в данном эксперименте волнение имело амплитуду сопоставимую с длиной звуковой волны, поэтому большинство погодных условий, когда были сделаны записи, находятся за границей применимости ММВ.

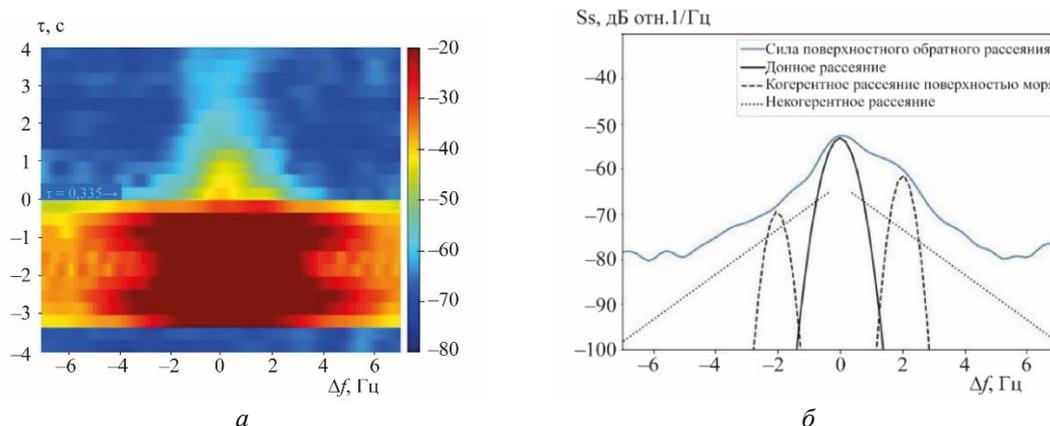


Рис. 2.

а — спектрограмма сигнала, усреднённая по импульсам, фазирование на  $-90^\circ$ , 2020 Гц;  
 б — частотная зависимость сигнала реверберации для задержки  $0,335$  с, нормированная с учетом потерь и площади рассеяния — сила поверхностного обратного рассеяния.

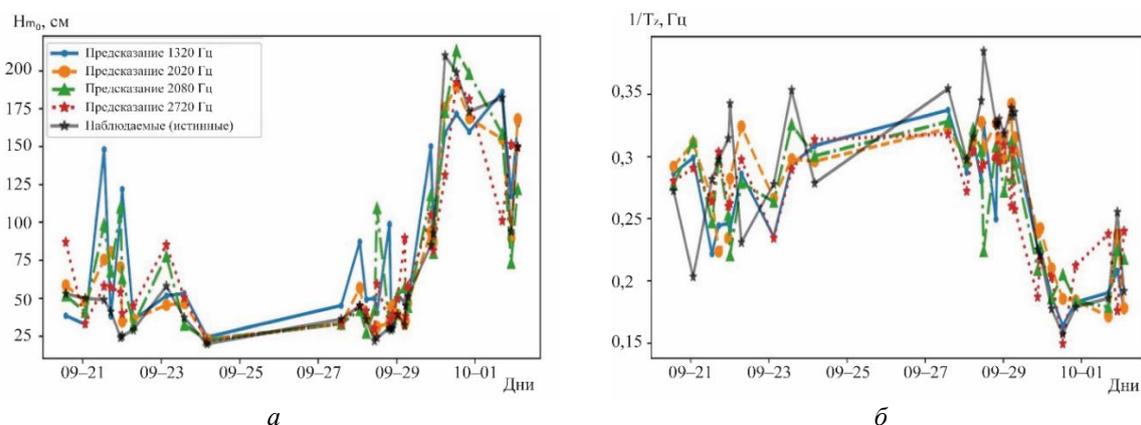


Рис. 3.

а — значимая высота волн; б — частота энерго-несущих волн; истинные значения, измеренные буём и предсказания на тестовой выборке 4-х регрессионных моделей XGBoost обученных для разных частот, включающих 20 деревьев решений максимальной глубины 10.

В работе [7] методом прямого численного моделирования рассматривалось рассеяние на не малых волнах, было показано, что в таком случае брэгговский пик уширяется, превращаясь в плато, обратное рассеяние на частотах выше брэгговской также должно увеличиваться с ростом волнения. Искажения, вносимые в доплеровский спектр обратного рассеяния пузырьками воздуха, образующимися и движущимися под поверхностью, рассматривались в [8]. Во-первых, перемещение пузырьков средним течением смещает центр спектра. Во-вторых, осциллирующее движение в поле течения, создаваемого поверхностными волнами, приводит к двустороннему уширению спектра, из-за чего он принимает треугольную форму.

**Машинное обучение** используется для решения задачи регрессии, восстановления неизвестной функции зависимости между независимыми переменными (признаками спектра) и зависимой величиной (характеристикой волнения). Т.е. авторы отказались от идеи использовать теоретическую связь между состоянием моря и спектром рассеяния, авторы сделали упор на создании модели, которую можно было бы обучить, после чего она станет обладать предсказательной силой. Применяется алгоритм градиентного бустинга над решающими деревьями XGBoost [9], алгоритм взят из библиотеки с открытым исходным кодом <https://github.com/dmlc/xgboost>. Напомним, что входными данными при это является набор признаков. Каждому получасовому интервалу отвечает трехмерный массив (куб) с осями: номер признака (1–9), угол и задержка. Искомая функция в этом случае приближается в виде суммы деревьев решений. В одном дереве решений входные данные последовательно сравниваются с пороговыми значениями в нескольких тестах больше/меньше да/нет. Число сравнений плюс один называется глубиной дерева, после всех сравнений дерево выдает ответ в виде константы. Процесс калибровки называется обучением модели. На этом этапе программе подаются как входные данные, так и выходные данные. Она выбирает, какой признак сравнивать в каждом узле, и регулирует пороговые значения, чтобы минимизировать функцию потерь. В качестве функции потерь здесь взята среднеквадратичная ошибка RMSE (1)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}, \quad (1)$$

где  $Y_i$  — наблюдаемое значение;  $\hat{Y}_i$  — предсказанное моделью значение;  $n$  — число примеров в тренировочной выборке. Затем предсказания модели проверяются на тестовой выборке (рис. 3), случайно выбранных 10 % измерений, которые модель не видела.

**Выводы.** Описанный эксперимент показал принципиальную возможность оценки параметров энерго-несущих и брэгговских поверхностных волн по рассеянию акустических сигналов дециметрового диапазона. Погрешность определения пиковой частоты составила 16 %, для существенной высоты волн — 46 %.

#### *Литература*

1. Ermoshkin A., Kapustin I. Estimation of the wind-driven wave spectrum using a high spatial resolution coherent radar // Russian J. of Earth Sciences. 2019. Vol. 19, № 3. P. 1.
2. Adibzade M., Shafieefar M., Akbari H., Panahi R. Multi-peaked directional wave spectra based on extensive field measurement data in the Gulf of Oman // Ocean Engineering. 2021. Vol. 230. P. 109057.
3. Titchenko Y., Karaev V., Ryabkova M. Measurements of the sea surface parameters using a new modification of underwater sonar on a marine platform in the Black Sea // IEEE OCEANS 2019-Marseille. 2019. P. 1–7.
4. Ermoshkin A. V., Kosteev D. A., Ponomarenko A. A., Razumov D. D., Salin M. B. Surface waves prediction based on long-range acoustic backscattering in a mid-frequency range // arXiv:2204.10153. 2022.
5. Doisy Y., Deruaz L., van IJsselmuide S.P., Beerens S.P., Been R. Reverberation suppression using wideband Doppler-sensitive pulses // IEEE J. of Oceanic Engineering. 2008. Vol. 33. P. 419–433.
6. Салин Б. М., Салин М. Б. Расчет спектра реверберационной помехи для доплеровской схемы локации // Акуст. жур. 2012. Т. 58, № 2. С. 258–266.
7. Разумов Д. Д., Салин М. Б. Особенности дифракции звука на взволнованной водной поверхности в среднем диапазоне частот // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 4. С. 98–110.
8. Салин Б. М., Салин М. Б. Механизмы формирования спектральных характеристик низкочастотной реверберации и прогнозные оценки // Акуст. жур. 2018. Т. 64, №. 2. С. 197–206.
9. Chen T., Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system // Proceedings of the 22-nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining. 2016. P.785–794.

Работа поддержана грантом РФФ № 20-77-10081 и в части предоставленных технических средств — госзаданием №0030-2021-0017.

## АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ДИСТАНЦИИ И ГЛУБИНЫ ИСТОЧНИКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫМ МЕТОДОМ

П. Д. Колбин, А. С. Корецкая, канд. техн. наук  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## ALGORITHM FOR PROCESSING OF HYDROACOUSTIC SIGNAL SOURCE RANGE AND DEPTH ESTIMATION RESULTS OBTAINED BY THE SPACE-TIME-FREQUENCY METHOD

P. D. Kolbin, A. S. Koretskaya, Ph.D.  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Разработан алгоритм обработки последовательности матриц со значениями меры сходства, получаемых пространственно-частотно-временным методом оценки дистанции и глубины источника гидроакустического сигнала в режиме шумопеленгования. Алгоритм основан на представлении временной последовательности матриц в виде иерархической структуры дерева. Точки матрицы меры сходства являются узлами деревьев, а индекс матрицы соответствует уровню иерархии.*

*The algorithm of processing the matrixes sequence of values measure similarity received by the space-time-frequency method of the assessment the distance and depth of the hydroacoustic signals source in the noise direction finding mode is developed. The algorithm is based on representation of temporary sequence of matrixes in the form of hierarchical structure like a tree. The similarity measure matrix's points are nodes of trees, and the matrix's index corresponds to hierarchy level.*

Оценка координат источника гидроакустического (ГА) сигнала в пассивном режиме работы гидроакустического средства является актуальной задачей. Один из подходов к решению этой задачи основывается на сопоставлении параметров принятого сигнала с прогнозными значениями, полученными с использованием расчёта акустического поля для совокупности возможных положений источника сигнала, взятых по сетке с некоторым шагом по дальности и глубине. К таким методам относятся вертикальный разностно-дальномерный, пространственно-частотно-временной (ПЧВ), частотно-угловой методы [1–8].

Перечисленные методы используют различные критерии и алгоритмы сопоставления, но результатом работы каждого из них является матрица значений меры сходства. Строки матрицы соответствуют возможным глубинам расположения источника сигнала, а столбцы — дальностям. В качестве меры сходства в большинстве алгоритмов используется коэффициент корреляции.

В работах [3, 4, 7] оценку положения источника сигнала предлагается осуществлять путём поиска глобального максимума среди всех вычисленных значений меры сходства. Проблемой при реализации такого поиска является то, что, как правило, формируются несколько зон, в которых значения меры сходства незначительно отличаются от максимального. На рис. 1 представлена матрица меры сходства, полученная методом ПЧВ. На рис. 1, *а* отображена исходная матрица сходства, а на рис. 1, *б* — после пороговой обработки по уровню 0,5.

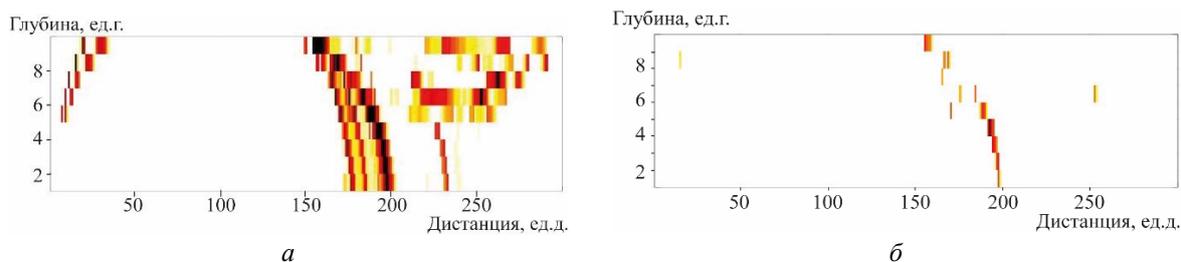


Рис. 1. Результаты оценки дистанции и глубины источника ГА сигнала методом ПЧВ.

*а* — исходная матрица; *б* — после пороговой обработки.

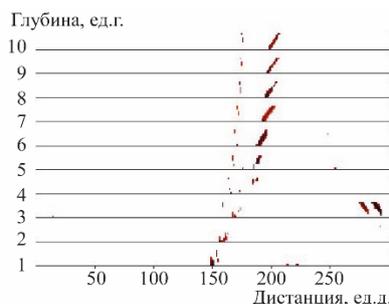


Рис. 2. Перегруппировка набора матриц ККор после пороговой обработки.

По оси абсцисс отложена дальность, по оси ординат — глубина, яркостью кодируется значение меры сходства. Величины по осям абсцисс и ординат указаны в номерах отсчётов матрицы прогнозных значений, получаемых от системы гидрологических расчётов. На рис. 1 и далее, если не оговорно иное, чёрный цвет соответствует максимальному значению меры сходства — 1,0, а белый — 0,0. В работе [9] предложено соотносить каждой подобной области одну точку, вычисляемую как центр масс. Затем полученные центры масс накапливаются по временным реализациям, для них строятся трассы перемещений и вычисляются суммарные значения меры сходства. Координаты максимума последнего принимается за оценку дистанции и глубины источника гидроакустического сигнала. Сложностью данного алгоритма является необходимость на каждой итерации разделять зоны, прошедшие пороговую обработку, и вычислять их границы. Рассмотрим последовательность из 10 матриц значений мер сходства, полученных пространственно-частотно-временным методом при равномерном удалении источника гидроакустического сигнала от приёмника (начальная точка дистанция с индексом 195, конечная — 207). Матрица, соответствующая начальной точке движения источника ГА сигнала, приведена на рис. 1. Проследим изменение матрицы при перемещении источника ГА сигнала.

На рис 2 представлено 10 яркостных картин расплoжённых горизонтально, по одной для каждой из глубин, содержащие построчно по 10 временных реализаций матрицы. На рис. 2 на четырёх из десяти глубин наблюдаются устойчивые группы максимумов, ещё на двух эти группы прерываются на несколько итераций. Также есть группы хаотичных и появляющихся только на несколько итераций максимумов. Задача разработанного алгоритма — выявить в последовательности матриц меры сходства стабильные во времени области, учитывая тренд перемещения этих областей. Разработанный алгоритм, основан на представлении этой временной последовательности в виде иерархической структуры типа дерево. Дерево — структура данных, представляющая совокупность элементов и отношений, образующих иерархическую структуру. Каждый элемент дерева называется вершиной (узлом) дерева. Начальный узел дерева называется корнем. Узлы (вершины) дерева соединены между собой направленными дугами, называемыми ветвями дерева [10]. Точки, прошедшие пороговую обработку (рис. 1, б) и характеризующиеся координатами в пространстве дальность/глубина/мера\_сходства, примем узлами деревьев, а индекс матрицы (последовательный по времени отсчёт) будет соответствовать уровню иерархии. Алгоритм содержит следующие этапы: пороговая обработка матрицы меры сходства, выделение точек превышающие порог, добавление последних в дерево с учётом индекса матрицы (такта входных данных), вычисление тренда изменения данных, содержащихся в узлах по каждой ветке, поиск ветки-ответа. При добавлении на текущем шаге очередной точки из матрицы меры сходства к уже существующим узлам, учитывается декартово расстояние между и оценкой ветви, как по дальности, так и по глубине, новый узел добавляется в дерево на соответствующий уровень иерархии. Пороговые значения расстояний, допустимых для добавления нового узла в ветку, настраиваются. Максимальный шаг по глубине принят равным одному горизонту (изменение глубины источника сигнала предполагается только последовательным, без скачков). На рис. 3 изображен пример построения дерева и перечислены полученные в результате ветви (для упрощения понимания показаны только данные дистанции, строб задан  $\pm 5$ ).

Строб по дистанции ± 5



Рис. 3. Пример заполнения структуры данными ЛМ.

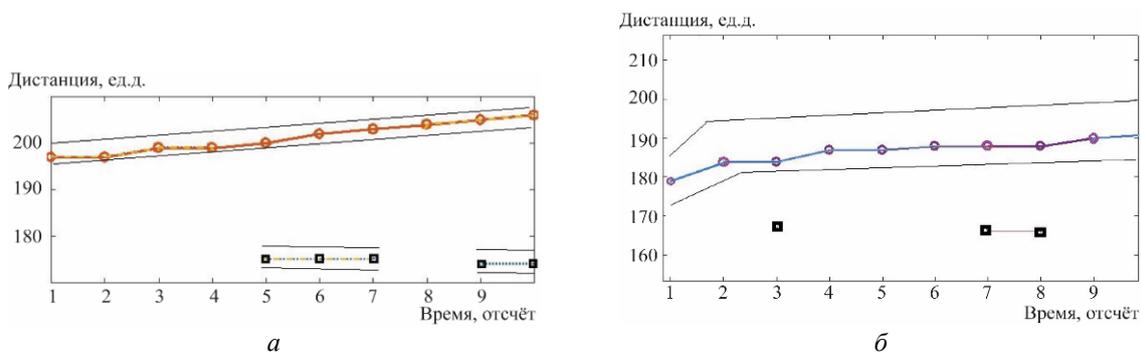


Рис. 4. Результаты добавления точек в ветки.

На рис. 3 на шаге 3 дистанция 18 км добавлена в ветви, содержащие на предыдущем шаге дистанции 16 км и 24 км, т.к. попадают в строб поиска относительно среднего значения трассы (18 и 22 соответственно). На том же шаге, дистанция 12 км не была добавлена ни в одну ветвь, поэтому было создано новое дерево, узлы которого на следующих итерациях обрабатываются наравне с остальными.

Пример подобной ситуации на смоделированном эксперименте изображен на рис. 4. На рис. 4, а изображена равномерно изменяющаяся по дистанции трасса, существующая на всех отсчётах, и участок трассы, начинающийся только с 5-го отсчёта. Тонкими линиями показаны сформированные цепочки перемещений, а линиями с маркерами, цепочки, отобранные алгоритмом как возможные решения. На рис. 4, б изображена схожая ситуация, новая ветвь в районе 168 ед.д. не завязалась из-за превышения stroba по времени, а в существующую ветку эти точки не были добавлены из-за превышения заданного stroba. После обработки очередной матрицы значений меры сходства, проводится перебор в глубину по всем существующим на данный момент деревьям, вычисляется суммарная мера сходства от корня до конечных узлов каждой ветки, как нормированные сумма значений, среди которых ищется ветка с максимальным значением.

В результате последовательной обработки разработанным алгоритмом набора матриц значений мер сходства, полученных методом ПЧВ, было сформировано 3 дерева (рис. 5). На рис. 5 сине-зеленым цветом выделена область stroba по дистанции, точки, попадающие в которую, добавляются в ветки деревьев. Из сформированных деревьев было выделено 5 ветвей (пронумерованы на рис. 5), которые соответствуют перемещениям точек матрицы мер сходства, поступающих на вход алгоритма. Для отсчёта № 6 около ветвей подписаны суммарные значения меры сходства к соответствующему отсчёту.

Ветка под номером 1 сформирована на 4 временном отсчёте и объединяет две точки, прошедшие пороговую обработку, находящиеся на незначительном расстоянии. Ветка номер 2 и номер 3 начались в разных точках дистанции, но сошлись к одной и тоже оценке дистанции, на последующих отсчётах точек, продолжающих эти трассы, найдено не было. Ветка 5, выделенная красным, соответствует заданному при имитации перемещению источника ГА сигнала. По обозначенным на бом отсчёте значениям меры сходства, из всех пяти альтернатив местоположения источника сигнала, разработанным алгоритмом выбрано истинное положение.

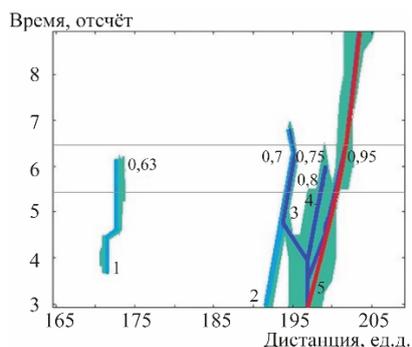


Рис. 5. Схема построенных деревьев.

Разработан алгоритм обработки последовательности матриц со значениями меры сходства, основанный на представлении временной последовательности матриц в виде иерархической структуры дерева. Показано его применение на матрицах мер сходства, получаемых пространственно-частотно-временным методом оценки дистанции и глубины источника гидроакустического сигнала в режиме шумопеленгования.

### *Литература*

1. Машошин А. И. Алгоритм определения координат подводного акустического источника с использованием корреляционной функции его сигнала // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 6. С. 784–792.
2. Машошин А. И. Исследование условий применимости корреляционной функции широкополосного многолучевого сигнала для оценки координат источника // Акуст. журн. 2017. Т. 63. Вып. 3. С.307–13.
3. Михнюк А. Н. Определение координат источника звука с помощью согласованных с морским волноводом алгоритмов обработки сигналов // Акуст. журн. 2009. Т.55. Вып.3. С.401–406.
4. Афанасьев А. Н., Зеленкова И. Д., Корецкая А. С., Мельканович В. С. Разработка программного макета метода оценки дистанции до цели и глубины погружения цели в пассивном режиме по пространственно-частотной и временной структуре принятого сигнала (метод ПЧВ) // Отчёт об ОКР «Дистанция» Этап №2. ЛЮКИ ОКР 586-01. СПб: ОАО «Концерн «Океанприбор», 2014. С. 53–135.
5. Корецкая А. С., Мельканович В. С. Определение координат источника гидроакустического сигнала с использованием методов нечеткого вывода // Гидроакустика. 2016. Вып. 25(1). С. 62–66.
6. Корецкая А. С., Мельканович В. С. Реализация лучевого метода оценки координат источника гидроакустического сигнала на основе интеллектуального сопоставления // Гидроакустика. 2017. Вып. 31(1). С.13–22.
7. Зеленкова И. Д., Волкова А. А., Никулин М. Н. Устройство получения информации о шумящем в море объекте. Патент РФ № 2590933. Заявл.27.04.2015, публ.10.07.2016.
8. Волкова А. А. Анализ вариантов метода оценки дистанции по спектрально-угловой структуре сигнала, принятого в режиме шумопеленгования // Сб. докл. Четвёртой науч.-техн. конф. «Взгляд в будущее». СПб.: ЦКБ МТ «Рубин», 2006. С. 51–56.
9. Колбин П. Д., Корецкая А. С., Пузаренко А. С. Статистическая обработка результатов оценки дистанции и глубины гидроакустического сигнала, получаемых частотно-угловым методом // Сб. докл. VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» МАГ-2021.
10. Кнут Д. Э. Искусство программирования // Основные алгоритмы. М.: Вильямс, 2002. Т1.

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ЛУЧЕВЫМ МЕТОДОМ

*А. С. Корецкая*, канд. техн. наук, *Н. С. Дмитриев*  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## IMPROVING THE ACCURACY OF HYDROACOUSTIC SIGNAL SOURCE COORDINATES ESTIMATION BY THE RAY METHOD

*A. S. Koretskaya*, Ph.D., *N. S. Dmitriev*  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Произведён анализ устойчивости Лучевого метода определения расстояния до источника гидроакустического сигнала и глубины его погружения к ошибкам измерения углов прихода лучей. Предложен способ повышения точности Лучевого метода путём расчёта дополнительных лучевых траекторий для набора углов прихода лучей в некотором диапазоне от измеренных значений, соответствующем погрешности их измерения.*

*An analysis of the stability of the Ray method for determining the distance to the hydroacoustic signal source and the depth of its immersion to errors in measuring the angles of arrival of rays was made. A method is proposed for improving the accuracy of the Ray method by calculating additional ray trajectories for a set of ray arrival angles in a certain range from the measured values, corresponding to the error of their measurement.*

Для решения задачи оценки координат источника сигнала в пассивном режиме работы гидроакустического комплекса предложено большое число методов и алгоритмов. Среди них можно выделить группу методов, которые основываются на лучевой модели распространения звука в океане.

Лучевая модель основана на гипотезе о распространении звуковой энергии вдоль линий, называемых лучами. Характер распространения звука в океане зависит от распределения скорости звука по глубине, которое в первую очередь зависит от температуры. Океан принято представлять как слоисто-неоднородную среду, в которой скорость звука меняется от одного горизонтального слоя к другому. При распространении звука в такой среде происходит рефракция (искривление траектории распространения звуковых лучей), а достигая границ среды (воздуха и дна), звуковые лучи отражаются от них. Принятый на антенне сигнал представляет собой сумму лучей, пришедших в точку наблюдения по разным траекториям. Эти лучи приходят в разные моменты времени, под разными углами и характеризуются разной интенсивностью. Лучевой метод [1–3] определения координат источника сигнала был предложен ещё в 1970-х гг. прошлого столетия. Он состоит в расчёте траекторий лучей, соответствующих измеренным углам прихода, определении координат точек их пересечения, вычислении разностей времён распространения лучей от каждой точки пересечения до антенны, принимающей сигнал, и определении координат источника сигнала по точке пересечения лучевых траекторий, для которой оказываются наиболее близкими измеренные и рассчитанные значения разностей времён распространения. Но попытки реализации Лучевого метода столкнулись с непреодолимой проблемой. Дело в том, что Лучевой метод является очень чувствительным к ошибкам измерения углов прихода лучей [4], которые до настоящего времени могли быть измерены с точностью, сопоставимой с шириной характеристики направленности в вертикальной плоскости (несколько градусов), что не позволяло получить удовлетворительный результат даже на малых дальностях. Не так давно появились работы [5, 6], в которых авторы для определения углов прихода лучей предлагают использовать подход, основанный на анализе взаимно корреляционных функций сигнала, принятого многоярусным веером характеристик направленности, сформированным в вертикальной плоскости. Описанный способ [6] позволяет производить оценку углов прихода лучей с точностью порядка  $0,25^\circ$ . Благодаря этим исследованиям интерес к Лучевому методу появился вновь, и возникла надежда на получение результатов его успешного применения на практике. Посмотрим, будет ли достаточна для этого указанная точность измерения углов прихода лучей. На рис. 1, б показан пример работы Лучевого метода, когда источник сигнала располагается на расстоянии 9622 м от приёмной антенны, обозначенной чёрным прямоугольником, и погружён на глубину 56 м.

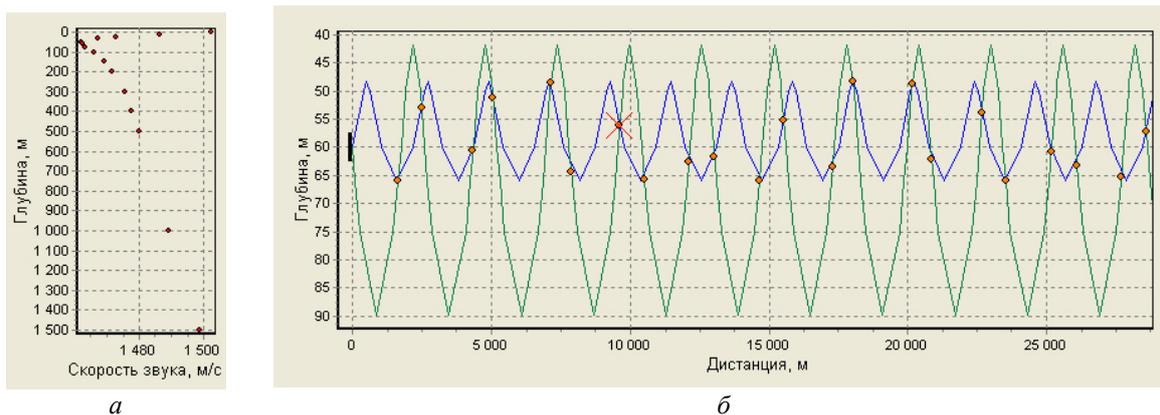


Рис. 1. Пример работы Лучевого метода.

*a* — вертикальное распределение скорости звука; *б* — лучевые траектории и точки их пересечения.

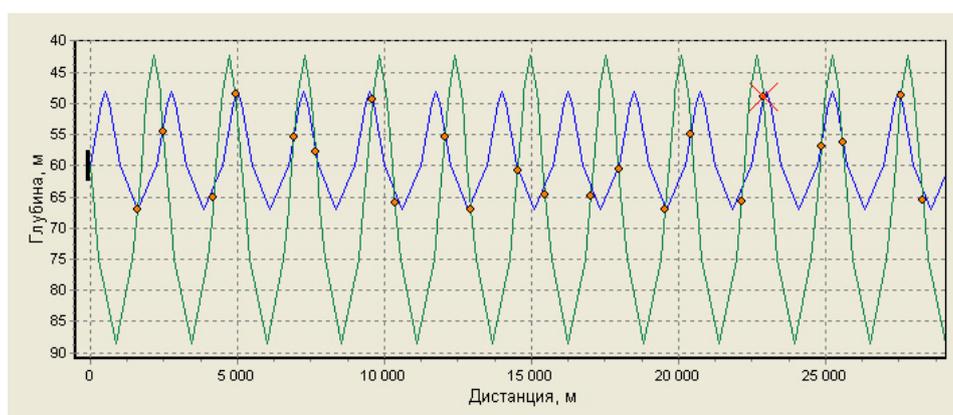


Рис. 2. Результат работы Лучевого метода в случае измерения углов прихода лучей с ошибкой  $0,1^\circ$ .

Параметры лучей, приходящих на антенну, были рассчитаны программой Дмитриева Н. С. для гидролого-акустических условий Чёрного моря в летний период. Вертикальное распределение скорости звука по глубине приведено на рис. 1, *a*. Ось подводного звукового канала расположена на глубине 50 м. Углы прихода двух наиболее интенсивных лучей составили  $1,2^\circ$  и  $-3,4^\circ$ , а задержка по времени между моментами их прихода — 1,3 мс. Можно видеть, что на дальностях до 30 км лучевые траектории пересеклись 22 раза (оранжевые точки). Красным крестом обозначено пересечение, для которого рассчитанное значение разности времён распространения оказалось наиболее близко к измеренной задержке. Посмотрим, как повлияют ошибки измерения углов прихода лучей на результат работы Лучевого метода. Предположим, что ошибка составила  $0,1^\circ$  и измеренные значения углов прихода лучей равны  $1,3^\circ$  и  $-3,3^\circ$ . Будем считать, что задержка по времени между моментами их прихода измерена без ошибок.

На рис. 2 показан результат работы Лучевого метода по этим входным данным. Ответом алгоритма служит точка, находящаяся на расстоянии 22904 м от антенны и на глубине 49 м, что не соответствует фактическому положению источника сигнала. На рис. 2 можно видеть, что в непосредственной близости к фактическому положению источника сигнала лучевые траектории тоже пересекаются (расстояние 9599 м, глубина 49 м). Но в этой точке разность времён распространения составила 0,9 мс, что отличается от измеренной задержки на 0,4 мс, в то время как в точке, найденной Лучевым методом, разность между измеренной и рассчитанной задержкой составила 0,1 мс. Таким образом, даже, казалось бы, незначительная ошибка измерения углов прихода лучей приводит к существенной ошибке определения координат источника сигнала. Для повышения устойчивости Лучевого метода к ошибкам измерения углов прихода лучей предлагается рассчитывать траектории не только по тем углам прихода лучей, которые измерены, а для набора углов в диапазоне не менее  $\pm 0,25^\circ$  от измеренных значений (рис. 3).

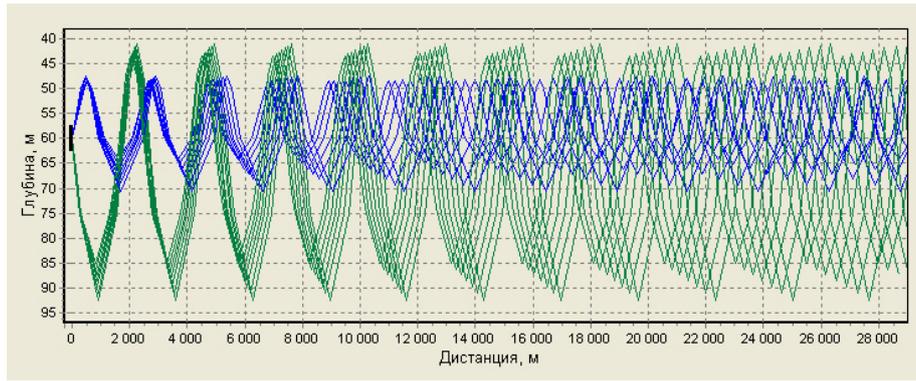


Рис. 3. Лучевые траектории, рассчитанные для набора углов в диапазоне  $\pm 0,3^\circ$  от измеренных значений.

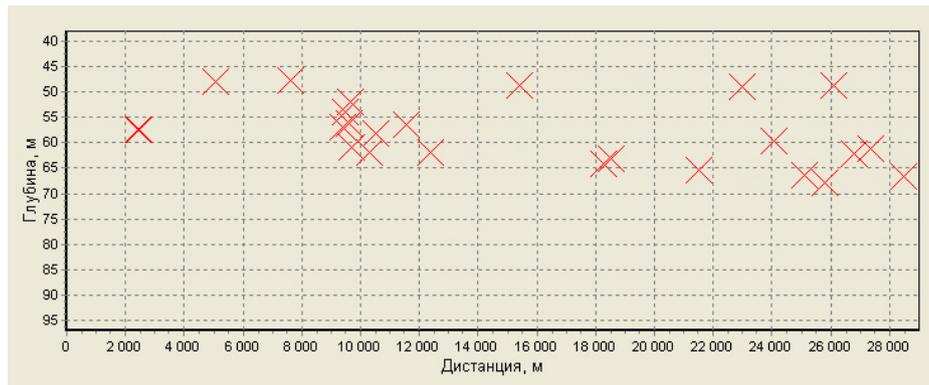
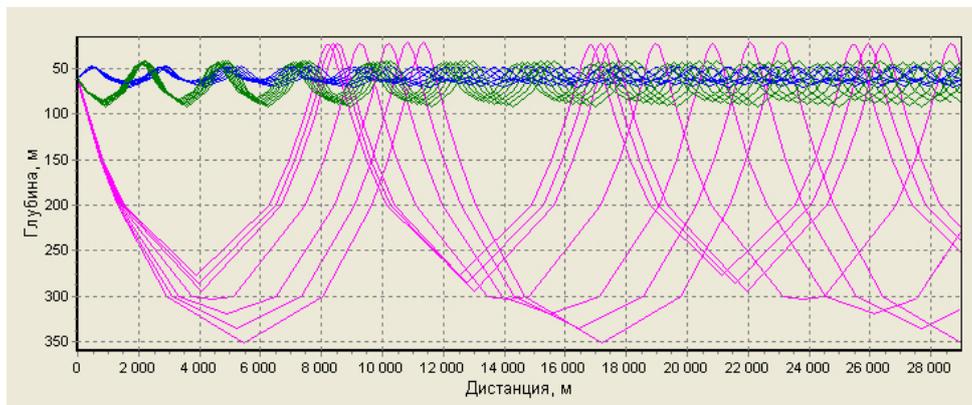


Рис. 4. Точки пересечения лучевых траекторий, разность между измеренной и рассчитанной задержкой для которых не превышает 0,2 мс.



*a*



*б*

Рис. 5. Результаты применения предложенного способа повышения устойчивости Лучевого метода.

*a* — лучевые траектории 3-х лучей, рассчитанные для набора углов в диапазоне  $\pm 0,3^\circ$  от измеренных значений; *б* — точки пересечения траекторий.

На рис. 4 показаны точки пересечения рассчитанных лучевых траекторий, разность между измеренной и рассчитанной задержкой для которых не превышает 0,2 мс. Можно видеть, что таких точек оказалось большое количество. Это объясняется наличием всего лишь 2-х лучей, что, как известно [4], в большинстве случаев не позволяет устранить неоднозначность оценки местоположения источника сигнала. Тем не менее, можно видеть, что наибольшее количество точек сконцентрировано в непосредственной близости к фактическому положению источника сигнала. Построим лучевые траектории, соответствующие углу прихода 3-го по интенсивности луча ( $-7,7^\circ$ ), и найдём точки пересечения всех рассчитанных лучевых траекторий (рис. 5). Очевидно, что 3 и более луча в большинстве случаев не пересекутся в 1 точке, так как точно измерить параметры лучей не представляется возможным. В связи с этим выполнялся поиск зон, в которых траектории пересекались попарно, расстояния между попарными пересечениями не превышали 10 м, а разности между измеренными и рассчитанными задержками для попарных пересечений не превышали 0,2 мс. На рис. 5, б красными крестами обозначены центры найденных зон. Можно видеть, что все они расположены в непосредственной близости к фактическому положению источника сигнала.

Чтобы получить единственное решение предлагается после нахождения зон попарных пересечений траекторий уменьшить шаг по углу, рассчитать дополнительные лучевые траектории и точки их пересечения внутри найденных зон и выбрать из них ту, для которой расстояния между попарными пересечениями и разности задержек окажутся минимальными.

#### *Литература*

1. Какалов В. А. Исследование возможности определения координат цели по оценкам параметров пространственно-временной структуры многолучевого сигнала гидроакустической шумопеленгаторной системой // Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Л.: ЦНИИ «Морфизприбор», 1973.
2. Какалов В. А., Виноградова Н. И., Есипова Е. И. Некоторые результаты исследований пространственно-временного способа определения места цели // Морское приборостроение. Сер. Акустика. 1973. Вып. 3. С. 88–92.
3. Баронкин В. М., Галкин О. П., Гладилин А. В. и др. Способ пассивного определения координат шумящего в море объекта. Патент РФ № 2602732. Заявл.25.06.2015, публ.20.11.2016.
4. Бородин В. В. Потенциальная точность определения положения источника звука в волноводе // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1983. Вып.16. С.88-103.
5. Комлев А. М., Мельканович В. С. Оценка углов прихода акустических лучей по двумерной корреляционной функции вертикального веера каналов обзора / Тр. X Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2010. С. 344–347.
6. Колбин П. Д., Мельканович В. С. Оценка параметров лучей гидроакустического сигнала на базе корреляционного анализа по выходу сформированных пространственных каналов / Тр. XIII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2016. С. 286–288.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОТЕРЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В АВАЧИНСКОМ ЗАЛИВЕ

*П. Н. Волгин*, д-р воен. наук, *Н. Г. Ковалевский*, д-р техн. наук, *В. В. Малый*, д-р техн. наук<sup>1</sup>  
АО «СПИИРАН-Научно-техническое бюро высоких технологий», Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1</sup>АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## ANALYSIS OF THE RESULTS OF HYDROACOUSTIC CALCULATIONS IN DETERMINING THE LOSS OF HYDROACOUSTIC ENERGY PROPAGATION IN THE AVACHA BAY

*P. N. Volgin*, Dr.Sc., *N. G. Kovalevskij*, Dr.Sc., *V. V. Malyj*<sup>1</sup>, Dr.Sc.  
SPIIRAS-HTR&DO Ltd, St. Petersburg, Russia  
<sup>1</sup>JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Значительное влияние на эффективность применения гидроакустических средств в Авачинском заливе, наряду с необходимостью учета сложного состава внешних шумовых помех, играют гидроакустические условия конкретной акватории моря и её подстилающей поверхности с учетом двумерной неоднородности морской среды и переменного рельефа дна по трассе распространения. Эти условия учитываются при определении возможных потерь при распространении в пространстве гидроакустической энергии, что оказывает существенное влияние на организацию построения и функционирования системы мониторинга подводной обстановки в конкретном районе. Естественно, что вторым по значимости фактором, влияющим на функционирование системы мониторинга подводной обстановки, является необходимость учета влияния сложных по своему составу внешних шумовых помех.*

*A significant influence on the effectiveness of the use of hydroacoustic means in the Avacha Bay, along with the need to take into account the complex composition of external noise interference, is played by the hydroacoustic conditions of a particular water area of the sea and its underlying surface in view of two-dimensional nonuniformity of marine environment and variable bottom relief along the propagation path. These conditions are taken into account to determine possible losses during the propagation of hydroacoustic energy in space, which has a significant impact on the organization of the construction and functioning of the underwater monitoring system in a particular area. Naturally, the second most important factor affecting the functioning of the underwater monitoring system is the need to take into account the influence of complex external noise interference.*

**Введение.** Анализ гидролого-акустической обстановки в Авачинском заливе показывает, что она в целом благоприятна для подводного наблюдения в слое глубин вероятного нахождения основных типов подводных объектов. Однако, проявление сезонных изменений, сложный рельеф дна, наличие разнообразных глубин в акватории залива вызывают необходимость, проведения предварительного анализа его гидролого-акустических условий (ГАУ) для принятия обоснованных решений по совершенствованию системы мониторинга подводной обстановки [1]. Исследование влияния ГАУ в Авачинском заливе может быть выполнено с использованием методик из Фонда алгоритмов и программ ВМФ [2], обеспечивающих проведение расчетов для учета влияния потерь при распространении гидроакустической энергии на возможности решения задач мониторинга подводной обстановки с использованием гидроакустических средств (ГАС). Естественно, что важнейшей составляющей при организации применения ГАС, кроме того, является необходимость учета сложного состава внешних шумовых помех [3].

**Анализ глубин и рельефа дна Авачинского залива.** Карта глубоководной и прибрежной (со значительно меньшими глубинами), части акватории Авачинского залива представлена на рис. 1. Общий вид пространственного распределения глубин и рельефа дна Авачинского залива можно наглядно представить с помощью данных, полученных из баз данных Etopo 5, путем представления (и визуализации) соответствующих вертикальных «разрезов» в направлении 90° от побережья на границе, в северной части и в средней залива (информация из программы Sonar Passive, разработка АО «СПИИРАН-НТБВТ» [2]). Трассы протяженностью 200 км, проходят в направлении 90° от побережья Камчатки. Для северной части Авачинского залива, на незначительных удалениях от берега (до 10–15 км), тянется небольшая шельфовая зона с постепенным плавным увеличением глубины до нескольких сот метров. Затем следует резкое увеличение глубины (свал глубин) с нарастанием до 1000 м на 10 км и далее переход к

глубоководным районам с глубинами, достигающими 2000–3000 м, и на удалении более 100 км — вплоть до максимальных глубин 6000–7000 м.

В центральной части залива имеет место наиболее сложный характер рельефа дна в направлении 90° от выхода из Авачинской бухты. На удалении 10 км от берега и выхода из Авачинской бухты — имеет место «яма» глубиной до 500 м и протяженностью до 20 км. Затем следует 20-ти километровая отмель с глубинами около 200 м, а затем — еще одна, более глубокая «яма», с глубинами до 680 м и протяженностью до 30 км, после чего — еще одна отмель с глубинами около 250 м. И только начиная с удаления от берега в 100 км, следует резкий переход к глубоководным районам с глубинами, достигающими 6000-7000 м на удалении в 200 км от береговой черты.

**Анализ влияния ГАУ на потери при распространении акустической энергии в северной части Авачинского залива.** Рельефы глубин получены из базы данных Etopo5, информация о пространственно-временной структуре среднестатистических ВРСЗ получена из базы данных GDEMV-3.0 (программа Sonar Passive, разработка АО «СПИИРАН-НТБВТ») и представлены отдельно для зимы и лета, в виде соответствующих графических материалов. Проведенный анализ ГАУ вдоль трассы (рис. 2) длиной 200 км, для января и июля месяцев, показал следующее.

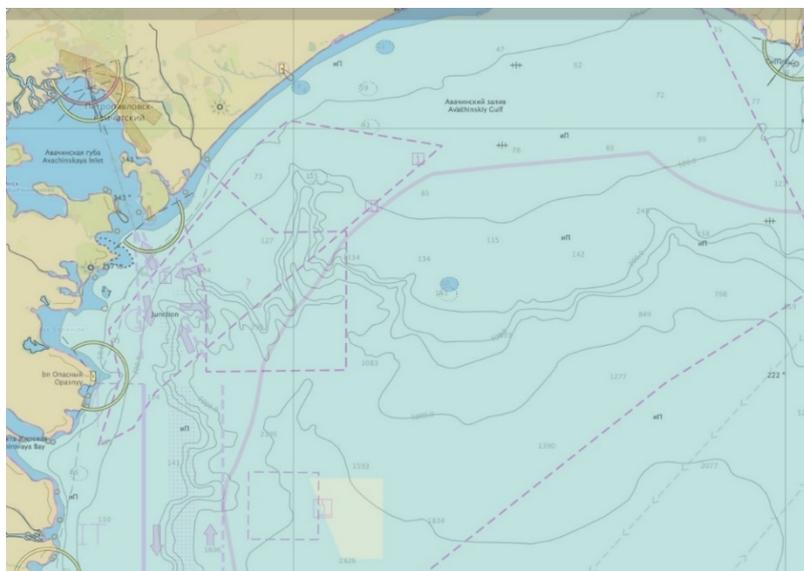


Рис. 1. Морская и прибрежная части Авачинского залива.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

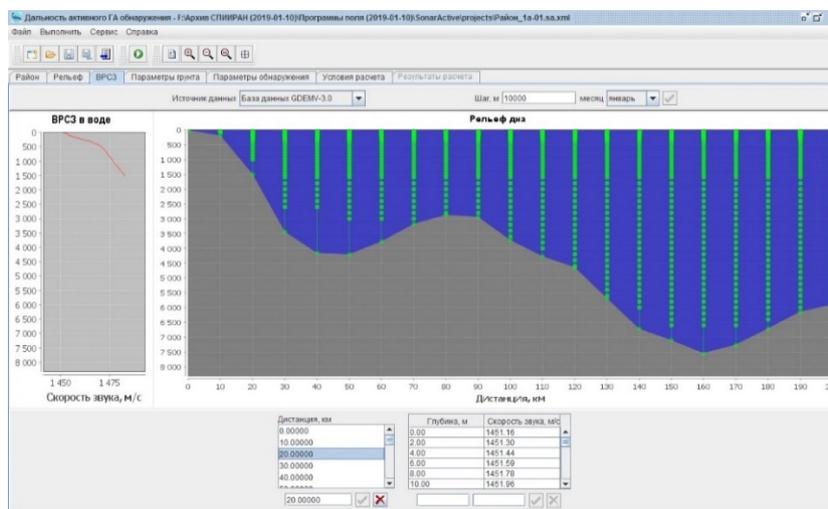


Рис. 2. Рельеф дна и пространственно-временная структура (изменение профиля) ВРСЗ вдоль трассы с учетом двумерно-неоднородной модели морской среды (январь).  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**1) Зима (январь).** Общий характер пространственно-временной структуры ВРСЗ и рельеф дна, а также графики ВРСЗ для точек по трассе на удалениях 20, 100 и 200 км от береговой черты несколько отличаются друг от друга. Для всех участков по трассе (начиная от участка вблизи побережья с глубинами 100–200 м и на глубинах 6000–7000 м на удалении до 200 км от берега) имеет место только один — первый — тип ВРСЗ с ярко выраженной положительной рефракцией от поверхности до дна. Для малых глубин (до 300–500 м) при небольших удалениях от берега (до 10 км) перепад скорости звука составляет от 1450 м/с на поверхности до 1470 м/с на глубине 500 м. Для больших глубин — при больших удалениях от берега перепад скорости звука составляет от 1450 м/с на поверхности до 1520 м/с на глубине 3500 м (30–40 км) и до 1560 м/с — на глубине 6000 м (150 км от берега).

Типичная картина потерь распространения (ПР), характеризующих общую картину акустического поля, при размещении источника на глубине 5 м, вблизи побережья, при удалении до 10–15 км, с дальнейшим резким свалом глубин вплоть до 7000 м, представлена на рис. 3. Расчеты выполнены для частоты 3кГц (в программе Sonar Active). В целом ГАУ с 1 типом ВРСЗ представляются благоприятными для освещения подводной обстановки, по крайней мере, в верхнем слое. При размещении антенн ГАС на небольших удалениях от берега, т.е. на шельфе с глубинами до 100–200 м, в глубоководных районах реально «просматривается» только верхний слой морской среды до глубин 50–100 м, т.е. обеспечивается обнаружение подводных объектов, находящихся на глубинах до 50–100 м. Возможность просмотра всего слоя воды с обнаружением объектов, находящихся в слое от поверхности до 400–500 м, появляется только при выносе антенн ГАС на удаление порядка 20 км от берега с глубинами моря более 200 м, и при размещении самой антенны на глубине порядка 150 м.

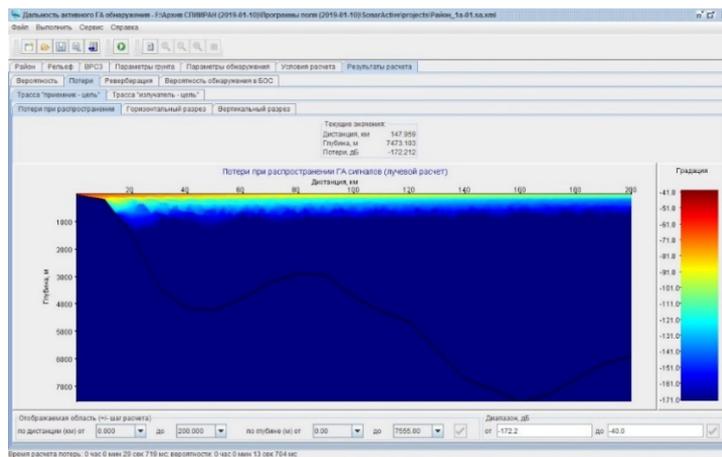


Рис. 3. ПР( $r, h$ ) (дБ) в зависимости от дистанции (км) и глубины (м) при размещении излучателя на глубине 5 м на удалении 10 км от берега (январь), масштаб глубин 0–7000 м.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

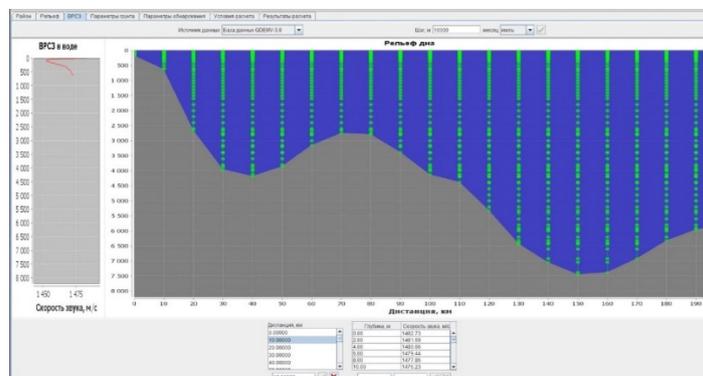


Рис. 4. Рельеф дна и пространственно-временная структура (изменение профиля) ВРСЗ (вдоль трассы с учетом двумерно-неоднородной модели морской среды) (июль).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**2) Лето (июль).** Общий характер пространственно-временной структуры ВРСЗ в июле и рельеф дна, приведен на рис. 4. Как показывает анализ рис. 4, в летний период (июль) для всех участков по трассе (начиная от глубин 200–500 м при удалении на 10–20 км вблизи побережья и до 6000–7000 м на удалении до 200 км) имеет место только один — ярко выраженный 6-й тип ВРСЗ с ПЗК 1-го рода. Горизонт оси ПЗК по всей трассе размещен на глубине 100 м. В целом, это благоприятные ГАУ с возможными явлениями:

- дальних зон акустической освещенности (ДЗАО), при размещении антенны выше оси подводного звукового канала (ПЗК) (например, на глубине 5 или 50 м);
- ПЗК, при размещении антенны на оси ПЗК, глубина 100 м (рис. 5).

При размещении антенны ГАС на участке с глубинами менее 100 м, удаление от берега до 5–7 км, имеет место самый неблагоприятный ярко выраженный 5 тип ВРСЗ с резкой отрицательной рефракцией от поверхности до дна, при этом ожидаемые дальности действия ГАС в этой зоне могут быть не более 5 км.

**Анализ влияния ГАУ на потери при распространении акустической энергии в центральной части Авачинского залива.** Проведенный анализ ГАУ вдоль трассы длиной 200 км, выполненный для двух месяцев (январь и июль), показал следующее.

**1) Зима (январь).** Общий характер пространственно-временной структуры ВРСЗ и рельеф дна, а также вид ВРСЗ (в январе) приведен на рис. 6.

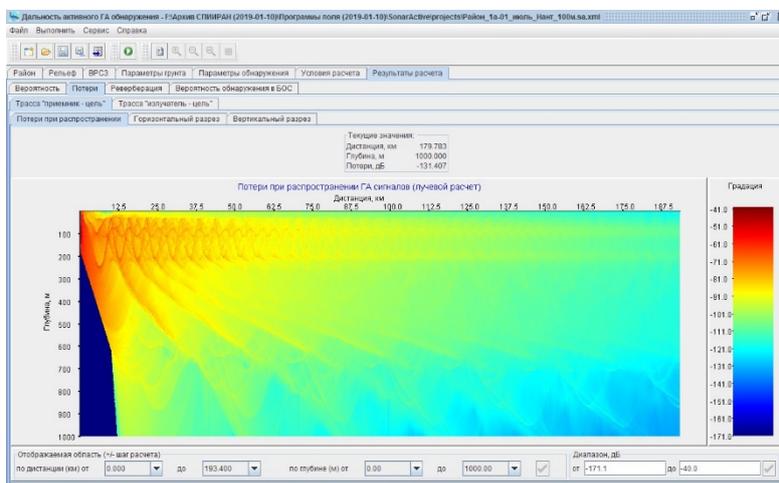


Рис. 5.  $PP(r, h)$  (дБ) в зависимости от дистанции (км) и глубины (м) при размещении излучателя на частоте 3 кГц на свале глубин (июль), масштаб глубин: 0–1000 м, излучатель на глубине 100 м. Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

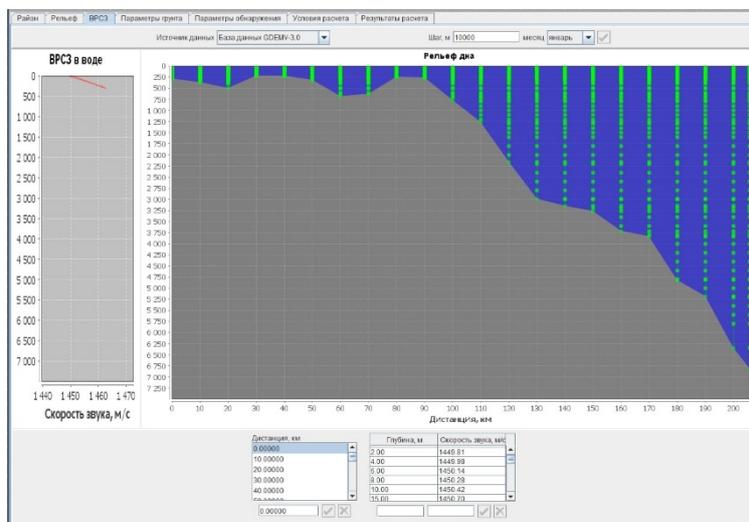


Рис. 6. Рельеф дна и пространственно-временная структура (изменение профиля) ВРСЗ по трассе на удалении до 200 км (г) от береговой черты (январь). Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Типичная картина ПР, характеризующих общую картину акустического поля, при размещении источника на глубине 5 м (характерно для ГАК нк с подкильными антеннами (ПА), вблизи побережья, при удалении до 10–15 км, с дальнейшим резким свалом глубин вплоть до 7000 м, представлена на рис. 7. Возможность просмотра всего слоя воды с возможным обнаружением подводных объектов (от поверхности до 400–500 м) появляется только при выносе антенн ГАС на удаление порядка 90–100 км от берега с глубинами моря более 200–300 м, и при размещении самой антенны на глубине порядка 100 м. Расчеты сделаны для частоты 3 кГц (в программе Sonar Active).

**2) Лето (июль).** Общий характер пространственно-временной структуры ВРСЗ до 200 км от береговой черты, и рельеф дна приведены на рис. 8.

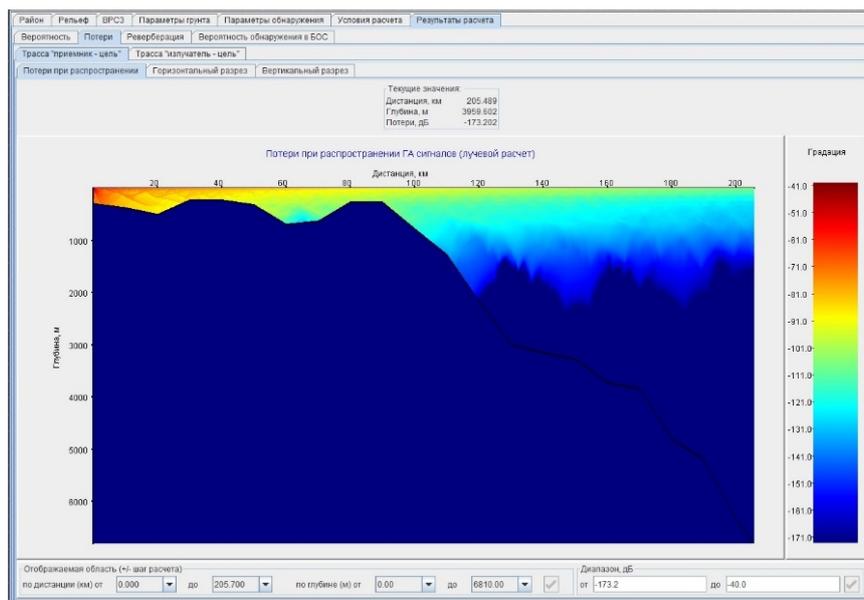


Рис. 7. ПР( $r, h$ ) (дБ) в зависимости от дистанции (км) и глубины (м) при размещении излучателя на глубине 5 м на удалении 10 км от берега (январь). Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

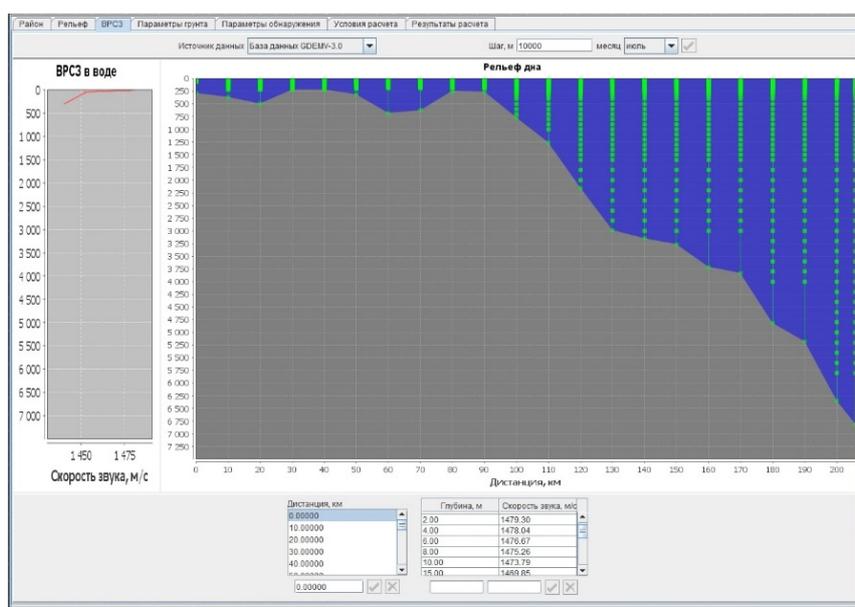


Рис. 8. Рельеф дна и пространственно-временная структура (изменение профиля) ВРСЗ и вид ВРСЗ в отдельных точках по трассе на удалении до 200 км от береговой черты (июль). Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

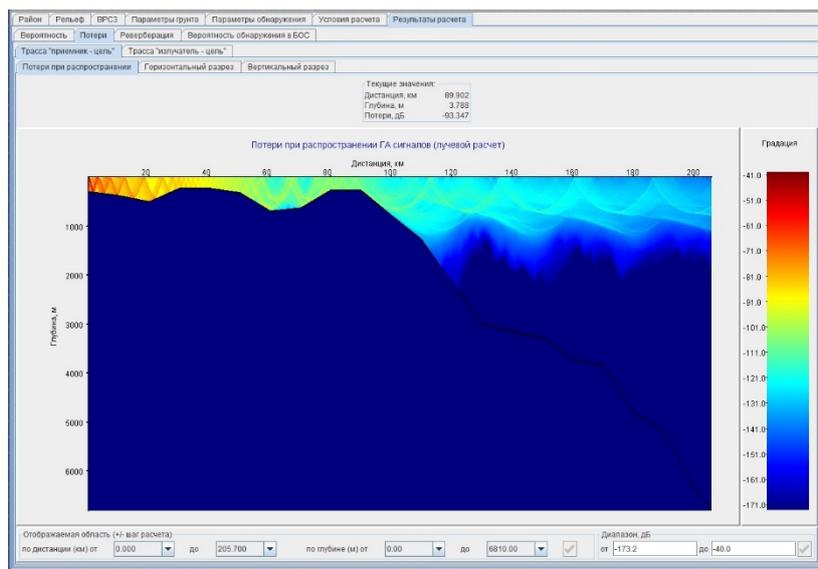


Рис. 9.  $PR(r, h)$  (дБ) в зависимости от дистанции и глубины при размещении излучателя на глубине 5 м на удалении 10 км, на частоте 3 кГц (июль): масштаб глубин 0–7000 м  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Анализ рис. 8 показывает, что для глубин менее 75 м имеет место 5 тип ВРСЗ, для остальных глубин — 6 тип (с ГОПЗК на глубине 75 м). При этом на глубинах до 200 м наблюдается ПЗК 2-го рода; в глубоководных районах, с глубинами более 300–400 м и на удалениях более 100 км, — ПЗК 1-го рода. Горизонт оси ПЗК по всей трассе размещен на глубине 75 м. В целом, это благоприятные ГАУ для глубоководных районов с возможными явлениями:

- ПЗК, при размещении антенны ГАС оси ПЗК (глубине 75 м);
- ДЗАО, при размещении антенны выше оси ПЗК (например, ПА ГАС нк с глубиной размещения 5 м, или опускаемая антенна ГАС нк на глубине до 50 м).

Вместе с тем, на участках с глубинами менее 75 м будет иметь место самый неблагоприятный ярко выраженный 5 тип ВРСЗ с резкой отрицательной рефракцией от поверхности до дна. Кроме того, при размещении антенны ГАС на глубине 5 м на участке с глубинами менее 200–300 м (при удалении антенны ГАС не более 90 км) оказывается невозможен просмотр глубоководных участков на значительных удалениях (рис. 9).

**Заключение.** Общий вывод, который можно сделать по результатам проведенного анализа, заключается в следующем. В целом гидролого-акустическая обстановка в Авачинском заливе благоприятная для подводного наблюдения — в слое глубин вероятного нахождения подводных объектов. При размещении антенн ГАС на глубинах 75–100 м, на удалении от берега на 90 км (на свале глубин) в зимний период — благодаря явлению ППЗК, а в весенний, летний и осенний период — благодаря наличию ПЗК с горизонтом оси на глубине 50–100 м (практически в течении всего времени года), в глубоководных районах будут иметь место явления ДЗАО и сплошной зоны акустической освещенности почти во всем слое возможного нахождения подводных объектов. Неблагоприятные явления, которые необходимо учитывать при использовании ГАС, связаны со следующими обстоятельствами:

- во-первых, при размещении антенн вблизи побережья на мелководных участках;
- во-вторых, в летне-осенний период — характерна ярко выраженная отрицательная рефракция в приповерхностном слое на глубинах от поверхности до 60–70 м.

Однако, в целом в весенне-зимний период ГАУ несколько более благоприятные, чем в летне-осенний период.

#### Литература

1. Зарайский В. А. Акустика океана. СПб.: ВМА имени Кузнецова Н. Г. 2003. 169 с.
2. Методики №08.4632 М, № 08.4645 М, №08.4646 М // АО «СПИИРАН-НТБВТ», ФАП ВМФ, 2016.
3. Волгин П. Н., Ковалевский Н. Г., Малый В. В. Влияние волнения моря на эффективность гидроакустических средств обнаружения при обнаружении подводных объектов в Авачинском заливе // Тр. XV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2020. С. 363–366.

## ВТОРИЧНОЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*А. В. Клячкин*, канд. физ.-мат. наук

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## SECONDARY HYDROACOUSTIC FIELD OF MULTILAYERED STRUCTURES

*A. V. Klyachkin*, Ph.D.

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

*В работе рассматривается вторичное гидроакустическое поле, возникающее в результате падения звука на многослойную конструкцию. На основе аналитической физико-математической модели выполнены численные расчеты. Показана возможность минимизации отраженного поля с помощью согласования импедансов слоев.*

*Secondary hydroacoustic field arising due to sound fall on the multilayered structure is considered in the paper. Numerical calculations are performed on the base of analytical physico-mathematical model. The possibility of reflected field minimization is shown with the help of matching layers impedances.*

**Физическая и математическая постановки задачи.** Рассмотрим падение плоской звуковой волны на трехслойную среду, состоящую из нижнего и верхнего водных полупространств и эластомерного (вязкоупругого) слоя между ними. Падающая снизу из нижнего полупространства на эластомерный слой плоская звуковая волна после многократных отражений внутри слоя дает в результате преломленную волну, прошедшую в верхнее полупространство, а также волну, отраженную в нижнее полупространство. Распространение волн внутри эластомерного слоя подчиняется уравнениям теории упругости, а в верхнем и нижнем водных полупространствах подчиняется волновым уравнениям. Будем ниже рассматривать установившиеся во времени процессы, зависимость от времени, пропорциональная множителю  $\exp(-i\omega t)$ , ниже опускается. Тогда волновые уравнения превращаются в уравнения Гельмгольца для Фурье-гармоник акустических полей давления в частотной области, имеющие вид в нижнем и верхнем водных полупространствах:

$$(\Delta + k_w^2) P_n(x, y, z, \omega) = 0; \quad (1)$$

$$(\Delta + k_w^2) P_e(x, y, z, \omega) = 0. \quad (2)$$

Здесь  $\omega$  — частота;  $c_w$  — скорость звука в воде;  $k_w = \omega / c_w$  — волновое число в воде;  $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$  — лапласиан. Уравнение упругих колебаний эластомерного слоя, который будем предполагать водоподобным, имеет вид:

$$(\Delta + k_{ef}^2) \vec{U} = 0. \quad (3)$$

Здесь  $\vec{U}$  — вектор смещений;  $k_{ef} = \omega / c_{ef}$  — эффективное волновое число;  $c_{ef}$  — эффективная скорость волн в эластомере, которая наряду с его плотностью  $\rho$  определяет его свойства. В общем случае эффективная скорость волн является комплексной величиной, которая может зависеть от частоты  $\omega$ . Для случая неперфорированного эластомера эффективная скорость с хорошей степенью точности равна продольной скорости в бесконечной среде, которая может быть выражена [1] через модуль Юнга ( $E$ ) и коэффициент Пуассона ( $\sigma$ ) или через коэффициенты Ламэ ( $\lambda, \mu$  — модуль сдвига) в виде:

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}. \quad (4)$$

По форме уравнение (3) совпадает с уравнением Гельмгольца, в котором роль скорости звука играет эффективная скорость колебаний. Замыкают математическую постановку задачи граничные условия (при  $z=\pm h$ ), которые требуют непрерывности нормальных скоростей и нормальных компонент напряжений и давлений и равенства нулю тангенциальных напряжений на границах эластомерного слоя. Целью дальнейшего анализа будет минимизация амплитуды отраженной волны.

**Основные результаты.** Выражения для падающей, прошедшей и отраженной волн имеют вид:

$$P_f(x, y, z, \omega) = \exp[ik_w (x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi + (z + h) \cos \theta)]; \quad (5)$$

$$P_e(x, y, z, \omega) = K_{pass} \exp[ik_w (x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi + (z - h) \cos \theta)]; \quad (6)$$

$$P_n(x, y, z, \omega) = \exp[ik_w (x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi + (z + h) \cos \theta)] + K_{refl} \exp[ik_w (x \sin \theta \cos \phi + y \sin \theta \sin \phi - (z + h) \cos \theta)]. \quad (7)$$

Здесь  $\theta, \phi$  — углы падения волны. Коэффициенты прохождения ( $K_{pass}$  — амплитуда прошедшей волны) и отражения ( $K_{refl}$  — амплитуда отраженной волны) в решении (6), (7) имеют вид:

$$K_{pass} = 2Z_w \left( Z_{sym} - Z_{ass} \right) / \left( 2Z_w \left( Z_{ass} + Z_{sym} \right) + Z_{ass} Z_{sym} + 4Z_w^2 \right); \quad (8)$$

$$K_{refl} = \left( Z_{ass} Z_{sym} - 4Z_w^2 \right) / \left( 2Z_w \left( Z_{ass} + Z_{sym} \right) + Z_{ass} Z_{sym} + 4Z_w^2 \right). \quad (9)$$

В выражения (8), (9) наряду с импедансом водного полупространства  $Z_w = \rho_w c_w / \cos \theta$  входят импедансы симметричных ( $Z_{sym}$ ) и антисимметричных ( $Z_{ass}$ ) колебаний эластомерного слоя. На рис. 1 показаны результаты расчета модуля коэффициента отражения от частоты для  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ . Параметры при расчетах: плотность и скорость звука в воде  $\rho_w = 1000, c_w = 1500$ . Результаты измерений продольной (звуковой) скорости, выполненные в [2], показывают  $c_l \geq 800$  м/с. При расчетах плотность, эффективная скорость волн в эластомере и толщина слоя эластомера:  $\rho = 1100, c_{ef} = 1200, 2h = 0,07$ .

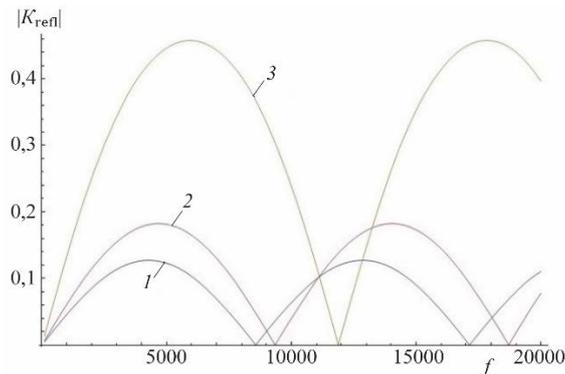


Рис. 1. Зависимость модуля коэффициента отражения от частоты для разных углов падения звуковой волны.

1 —  $\theta=0^\circ$  нормальное падение, синий график; 2 —  $\theta=30^\circ$ , красный график; 3 —  $\theta=60^\circ$ , зеленый график.

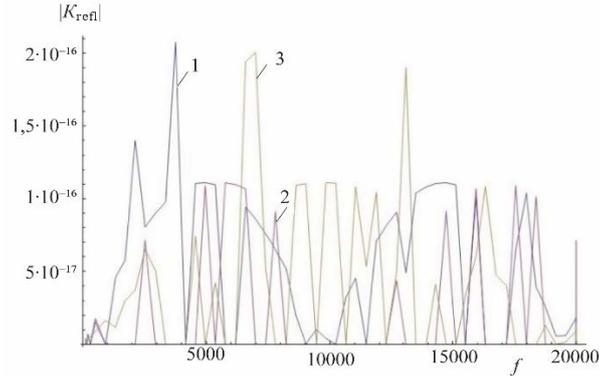


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента отражения от согласованного эластомерного слоя от частоты для разных углов падения звуковой волны.

1 —  $\theta=0^\circ$  нормальное падение, синий график; 2 —  $\theta=30^\circ$ , красный график; 3 —  $\theta=60^\circ$ , зеленый график.

При минимизации амплитуды отраженной волны (иначе говоря, согласовании эластомерного слоя) в работе было получено выражение для эффективной скорости волн в слое:

$$c_{ef} = \rho_w c_w (\rho_w^2 \sin^2 \theta + \rho^2 \cos^2 \theta)^{-0,5}. \quad (10)$$

При нормальном падении из (10)  $c_{ef} = 1363,64$ . На рис. 2 показаны результаты расчета модуля коэффициента отражения от частоты для  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ . Расчеты были выполнены при прежних значениях параметров, но эффективная скорость волн вычислялась согласно (10). Из графиков на рис. 2 видно, что согласование привело практически к отсутствию отражения от слоя эластомера. Усложним задачу — добавим тонкий стальной слой между слоем эластомера и верхним водным полупространством (рассмотрено в [3] в терминах метода длинных линий). Будем пренебрегать тангенциальными напряжениями на границе эластомера и стальной пластины — т. е. рассмотрение слоев остается в рамках теории четырехполюсников. В силу тонкости (толщина стали — 8 мм) согласно [4] будем учитывать только изгибные колебания стали, пренебрегая колебаниями сжатия. Тогда выражение для коэффициента отражения получим в виде:

$$K_{refl} = \frac{Z_{ass} Z_{sym} - 4Z_w^2 + Z_{ass}^{st} (Z_{ass} + Z_{sym} - 4Z_w)}{2Z_w (Z_{ass} + Z_{sym}) + Z_{ass} Z_{sym} + 4Z_w^2 + Z_{ass}^{st} (Z_{ass} + Z_{sym} + 4Z_w)}. \quad (11)$$

В выражении (11)  $Z_{ass}^{st}$  — импеданс изгибных колебаний стальной пластины. Выполнив численные расчеты с теми же параметрами эластомера  $\rho=1100, c_{ef} = 1200, 2h=0,07$ , получим зависимость модуля коэффициента отражения от частоты для  $\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ , изображенную на рис. 3. При минимизации амплитуды отраженной волны (иначе говоря согласовании эластомера при наличии стальной пластины) в работе было получено выражение для эффективной скорости волн в слое:

$$c_{ef} = 2\omega h \left( \frac{2\omega h}{c_w} \sin^2 \theta + z^2(\theta, \omega) \right)^{-0,5}. \quad (12)$$

В выражении (12) функция  $z(\theta, \omega)$  определяется как корень трансцендентного уравнения:

$$\beta_2 z^2 + \beta_0 + z \text{ctgz} = 0. \quad (13)$$

В уравнении (13) коэффициенты  $\beta_2$  и  $\beta_0$  зависят как от частоты  $\omega$  и угла падения  $\theta$ , так и от других параметров задачи.

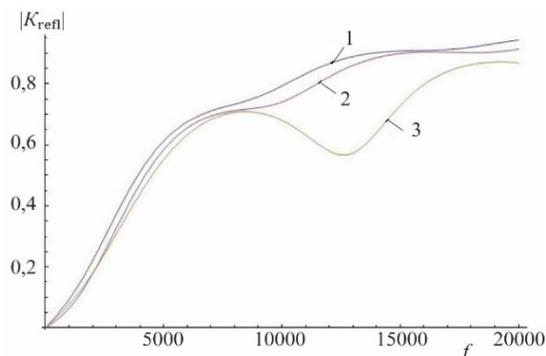


Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента отражения (при наличии тонкого стального слоя) от частоты для разных углов падения звуковой волны.

1 —  $\theta=0^\circ$  нормальное падение, синий график; 2 —  $\theta=30^\circ$ , красный график; 3 —  $\theta=60^\circ$ , зеленый график.

Выполненные численные расчеты для наиболее важного случая нормального падения ( $\theta = 0$ ) звуковой волны на систему вода-эластомер-стальная пластина-вода дали значения эффективных скоростей волн, обеспечивающих согласование:  $c_{ef} = 1013,7 - i13,24$  для частоты 100 Гц;  $c_{ef} = 1035,91 - i129,54$  для частоты 1000 Гц;  $c_{ef} = 2230,88 - i464,61$  для частоты 10000 Гц. Отрицательная мнимая часть, появившаяся у эффективной скорости при согласовании импедансов, означает необходимость потерь (поглощения) в эластомере, сильно растущих с увеличением частоты (от 1,3 % при 100 Гц до 20,8 % при 10000 Гц). Существенно, также, что для согласования эластомер с ростом частоты должен становиться более жестким: при 100 Гц он в 1,5 раза мягче воды, а при 10000 Гц — он должен быть в 1,5 раза жестче воды. Расчеты коэффициента отражения по формуле (11) (выполненные для проверки согласования) для данных частот и эффективных скоростей показали, что вещественная и мнимая составляющие коэффициента отражения имеют значения, меньшие  $1,3 \cdot 10^{-16}$ .

Основной вывод выполненной работы: минимизация коэффициента отражения для слоистой среды путем согласования импедансов возможна. Однако она будет разной для разных слоистых структур: для эластомера без стальной пластины эффективная скорость (10) не зависит от частоты, хотя зависит от угла падения; при добавлении в систему стальной пластины эффективная скорость (12), (13) будет зависеть как от угла падения, так и от частоты. Подобный подход может быть полезен при синтезировании микронеоднородной структуры эластомера, работающего в одноволновом режиме, когда все побочные пространственные спектры (кроме основного — нулевого) являются неоднородными и быстро затухающими в пространстве.

#### Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М.: Издательство «Наука». 1987. 248 с.
2. Буланова Н. В., Глазанов В. Е., Зайцева В. Д. Скорость звука в некоторых каучуках // Акуст. журн. 1976. Т. 22, № 8. С. 286.
3. Глазанов В. Е., Михайлов А. В. Экранирование гидроакустических преобразователей. СПб.: Издательство «Элмор». 2004. 256 с.
4. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики. Л.: Издательство «Судостроение». 1972. 352 с.

## АКТУАЛЬНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЭТАЛОНА ДЛЯ ФАЗОВОЙ КАЛИБРОВКИ ГИДРОФОНОВ

*Б. И. Хатамтаев*

ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская область, Россия

## THE RELEVANCE OF CREATING A STANDARD FOR PHASE CALIBRATION OF HYDROPHONES

*B. I. Khatamtaev*

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

*Рассмотрены области применения фазовой калибровки в современных гидроакустических технологиях. Проведен анализ существующих методов фазовой калибровки и выявлены проблемы калибровки и определения акустического центра гидрофона. Поставлены задачи, решение которых необходимо для создания эталона для фазовой калибровки гидрофонов.*

*The areas of application of phase calibration in modern hydroacoustic technologies are considered. The analysis of the existing methods of phase calibration was carried out and the problems of calibration and determination of the acoustic center of the hydrophone were identified. Problems are set, the solution of which is necessary to create a standard for the phase calibration of hydrophones.*

**Фазовая калибровка и современные гидроакустические технологии.** Развитие гидроакустических технологий выдвигает на первый план проблемы измерения фазочастотных характеристик (ФЧХ) гидроакустических преобразователей (гидрофонов). Для гидроакустических антенн, обеспечивающих пространственно избирательное излучение или прием звукового давления в водной среде и состоящих из электроакустических преобразователей, необходимы точные измерения фазы при подборе их элементов, поскольку различия в фазовых характеристиках элементов приводят к нарушению пространственной избирательности, ошибкам при формировании акустического луча. Современные технологии позволили создать многолучевые, растровые излучатели. Активный элемент современного излучателя составной, и его набирают из нескольких элементарных излучающих ячеек. Для того чтобы обеспечить требуемые сегодня характеристики луча, сканирующего пространство, погрешность калибровки элементарных излучающих ячеек не должна превышать 3–9° по ФЧХ и 4–5 % по АЧХ на частотах до 1 МГц. Более жестким требованиям должен удовлетворять излучатель звуковизора, пространственное разрешение которого составляет не более 1° по углу и нескольких сантиметров по расстоянию. Пространственное разрешение с такими данными позволяет не только выделить отметку в направлении объекта, но и его форму [1]. Комплексная чувствительность необходима для построения объемного изображения в голографической системе звуковидения.

В медицинском ультразвуке у излучающих преобразователей улучшаются характеристики в сторону более высоких частот и более широкой полосы пропускания. Поэтому для обеспечения конкурентоспособности отечественных медицинских УЗИ-сканеров необходимо контролировать АЧХ, ФЧХ и диаграммы направленности ультразвуковых датчиков, которые являются важнейшей частью УЗИ-сканеров. Когда требуется контролировать заданную форму ФЧХ и правильность отклика преобразователя, необходим так называемый «золотой» эталонный гидрофон, откалиброванный по фазе абсолютным методом.

**Фазовая калибровка для решения экологических задач.** Востребованность фазовой калибровки гидрофонов возросла в связи с необходимостью решать экологические задачи, обусловленные шумовым загрязнением морских акваторий. Рыбы и многие беспозвоночные могут обнаруживать звуковое давление, однако большие колебания давления могут привести к разрыву плавательных пузырей у рыб и вызвать травмы тканей, в то время как воздействие на ткани больших колебаний звуковых частиц подлежат исследованиям. Сегодня формируется набор параметров для оценки негативного воздействия звука на различные виды рыб, млекопитающих и других обитателей моря. В качестве таковых рассматриваются параметры, существенно отличающиеся от используемых в воздушной акустике: звуковой «щелчок», звуковой «рывок», «треск» и т.п. [2]. Для оценки таких параметров необходимо восстанавливать

точную форму акустического сигнала путем деконволюции сигнала, зарегистрированного гидрофоном. Современные зарубежные эталонные средства позволяют определять ФЧХ гидрофонов и излучателей в частотном диапазоне от сотен герц до десятков МГц с точностью от 1,5 до 6,5 %. В рамках работ по созданию прецизионных гидроакустических эталонных установок нового поколения поставлена задача оснастить специальный многофункциональный метрологический бассейн, создаваемый во ВНИИФТРИ, установкой для измерения ФЧХ гидроакустических преобразователей в диапазоне частот от 1 до 500 кГц.

**Фазовая калибровка гидрофона методом взаимности.** В настоящее время метод взаимности остается единственным абсолютным методом калибровки гидрофонов по полю в этом частотном диапазоне, так как принятая в 2020 г. новая редакция стандарта МЭК [3] не содержит рекомендаций по применению оптических методов на частотах от 1 до 500 кГц. При измерениях по методу взаимности ФЧХ гидрофона получают одновременно с его АЧХ в результате совокупных измерений с использованием трёх преобразователей: излучатель  $P$ , обратимый преобразователь  $T$  и калибруемый гидрофон  $H$ . В соответствии с определением, чувствительность гидрофона связывает напряжение на выходе гидрофона и звуковое давление в точке расположения акустического центра (АЦ) гидрофона в звуковом поле в отсутствие гидрофона. Из формулы вычисления комплексной чувствительности гидрофона  $\dot{M}_H$  следует выражение для фазового угла чувствительности [4]:

$$\arg(\dot{M}_H) = \frac{1}{2}[\varphi_{PH} + \varphi_{TH} - \varphi_{PT} + k(d_{PH} + d_{TH} - d_{PT})] - \frac{\pi}{4}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{PH} = \arg(\dot{Z}_{PH})$ ,  $\varphi_{TH} = \arg(\dot{Z}_{TH})$ ,  $\varphi_{PT} = \arg(\dot{Z}_{PT})$  — фазовые углы комплексных передаточных импедансов пары излучатель–гидрофон  $\dot{Z}_{PH}$ , пары обратимый преобразователь — гидрофон  $\dot{Z}_{TH}$  и пары излучатель–обратимый преобразователь  $\dot{Z}_{PT}$ ;  $kd_{PH}$ ,  $kd_{TH}$ ,  $kd_{PT}$  — фазовые набеги звуковой волны при ее распространении от излучателя к приемнику;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны;  $d_{PH}$ ,  $d_{TH}$ ,  $d_{PT}$  — расстояния между АЦ излучателя и приемника.

Одним из параметров, входящих в формулу взаимности, является расстояние. Фазовые измерения потребовали повышения точности расстояния, что неизбежно привело к необходимости понятия расстояния, которое нужно использовать в формуле метода взаимности.

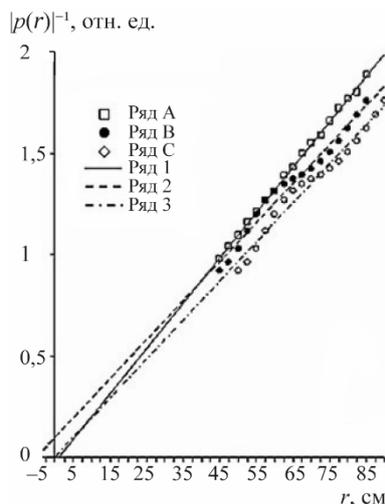
**Экспериментальное определение акустического центра гидрофона.** В стандарте на калибровку [5] гидрофонов использовали определение АЦ — точка на преобразователе или рядом с ним, из которой расходящиеся сферически звуковые волны, излучаемые этим преобразователем и наблюдаемые в удаленных точках, кажутся расходящимися. Особенность этого определения — множество удаленных точек, в которых волна рассматривается как сферическая. Как следствие такого определения — два подхода к определению положения АЦ гидрофона: оценка близости зависимости звукового давления от расстояния к закону  $1/r$  или оценка близости волновой поверхности к сфере. В самом стандарте рекомендован первый подход, который успешно применяют для микрофонов [6]. Экспериментальное определение АЦ основано на зависимости звукового давления  $p(r)$  от расстояния  $r$  в поле сферической волны:

$$|p(r)|(r - \Delta r) = const,$$

где  $\Delta r$  — смещение АЦ относительно точки, принятой в эксперименте за начало отсчета расстояния. Тогда:

$$\Delta r = r - \frac{1/|p(r)|}{\frac{\partial(1/|p(r)|)}{\partial r}}. \quad (2)$$

В эксперименте звуковое поле искажено звуковыми волнами, рассеянными излучателем, гидрофоном-приемником и штангами, применяемыми для позиционирования гидрофонов (рис. 1).

Рис. 1. Зависимости  $|p(r)|^{-1}$ .

На рис. 1 приведены графики, построенные по результатам измерений в отсутствии (ряд А) и при наличии (ряд В) рассеяния. Идеальные измерения в отсутствии рассеяния получены для бескорпусных излучателя и гидрофона в виде сфер, и вывешенных под водой на собственных кабелях без каких-либо дополнительных креплений. В качестве опорных точек при определении расстояния использовали геометрические центры активных элементов излучателя и приемника. Рядом 1 представлена прямая наилучшего приближения «идеальной» зависимости по методу наименьших квадратов. Точка пересечения прямой с осью расстояний практически совпадает с началом координат, геометрические центры активных элементов могут быть приняты за АЦ излучателя и гидрофона. Зависимость, полученная при тех же параметрах эксперимента с использованием креплений гидрофона (ряд В), заметно отличается от «идеальной». Точка пересечения прямой наилучшего приближения ряда В (ряд 2) с осью расстояний оказывается, существенно смещенной относительно начала координат. Ряд 3 — прямая наилучшего приближения скорректированной зависимости (ряд С) проходит через начало координат, однако, коррекция только ухудшила результат. Ряд С более смещен относительно «идеальной» зависимости, чем ряд В. Очевидно, что введение поправки к измерительным расстояниям в таком случае может приводить как к неразумно большим погрешностям в определении расстояния между АЦ преобразователей, так и к неправильной оценке этих погрешностей. По этой причине в современных стандартах [7, 3] вместо АЦ гидрофона вынужденно используют понятие опорного центра. Рекомендаций по выбору опорного центра стандарты не приводят. Проблема определения АЦ гидрофона остается открытой.

**Позиционирование гидрофона при измерениях фазового угла чувствительности.** Для повышения точности измерений положение геометрического центра калибруемого гидрофона юстируют по лучу лазера с помощью прецизионной 3-D системы позиционирования. По лучу лазера можно позиционировать только контур активного элемента гидрофона, в то время как положение собственно активного элемента, скрытого непрозрачным влагонепроницаемым покрытием, остается неизвестным. Чтобы определить положение активного элемента используют специальные методы, вплоть до рентгена, потому что активный элемент нередко смещен относительно оси симметрии гидрофона. Смещение положения АЦ от опорной для юстировки точки в 1 мм приводит к частотно-зависимой ошибке в измеренной ФЧХ, которая на частоте 150 кГц достигает  $18^\circ$ . Исходя из этого проблемой является определение положения АЦ гидроакустического преобразователя — физического тела определенных размеров и формы.

**Получение детальной фазочастотной характеристики.** При фазовых измерениях условия свободного поля обеспечивают временной селекцией тональных импульсов. Возможность получать значения АЧХ и ФЧХ на заданных частотах позволяет решать задачи контроля при подборе преобразователей антенных решеток. Однако, задачи, связанные с необходимостью восстанавливать форму сигнала, требуют знания детальных АЧХ и ФЧХ. При этом трудоемкость измерений тонально импульсным методом становится чрезмерной.

Во ВНИИФТРИ разработан прием, позволяющий измерять детальные АЧХ гидрофона за один акт излучения шумового либо ЛЧМ сигнала. АЧХ гидрофона по полю получают скользящим комплексным взвешенным усреднением (СКВУ) экспериментальной частотной зависимости, зарегистрированной в реверберационном звуковом поле бассейна [8]. Подробность получаемых АЧХ определяется продолжительностью излучаемого сигнала.

К недостаткам измерений абсолютных ФЧХ следует отнести чувствительность не только к ошибкам в расстояниях, но также большую чувствительность к внешним воздействиям, любых толчков и вибраций, мало поддающихся контролю. Существуют косвенные методы определения ФЧХ. Их преимущество — устойчивость к помехам, недостаток — получаемая ФЧХ является относительной. Ценность такой ФЧХ:

- во-первых — независимый метод, который незаменим при анализе погрешностей;
- во-вторых — замена сложной и трудоёмкой процедуры прямых измерений фазовых углов математическим вычислением.

В связи с этим весьма актуальной является разработка косвенного метода получения ФЧХ гидрофона. Это позволит значительно расширить возможности эталонной установки.

**Проблема размерности калибровочных данных.** В результате калибровки потребитель получает два набора данных — АЧХ и ФЧХ. При этом каждый набор может содержать до нескольких тысяч числовых значений. Но даже эти тысячи не решают проблемы, необходимой для осуществления деконволюции принятых сигналов, потому что заранее не известно, с каким интервалом по частоте будут представлены эти сигналы. Последнее влечет за собой необходимость интерполяции калибровочных данных вне зависимости от того с какой подробностью по частоте они получены. Поэтому большая размерность калибровочных данных делает актуальным решение проблемы компактного представления калибровочных данных гидрофона.

**Заключение.** Исходя из поставленных проблемных вопросов можно сформулировать следующие задачи, которые необходимо решить при создании эталонной установки для калибровки гидрофонов по фазе: выбрать и обосновать абсолютный метода измерения фазового угла чувствительности гидрофона; разработать способ экспериментального определения положения АЦ гидрофона; разработать способ измерения фазового угла чувствительности для АЦ гидрофона; обобщить способ измерения детальных АЧХ на ФЧХ; разработать расчетный метод получения ФЧХ; разработать способ представления калибровочных данных в аналитическом виде; разработать и аппаратно реализовать измерительную установку для фазовой калибровки гидрофона; выполнить метрологические исследования установки; подтвердить метрологические характеристики установки сличениями.

#### *Литература*

1. Лекомцев В., Титаренко Д. Современные средства подводного звуковидения // СТА. 2011. № 3 С. 36.
2. Interim Best Practice Guide for Underwater Particle Motion Measurement for Biological Applications. Document number XX. Technical report by Exeter University for the IOGP Marine Sound and Life Joint Industry Programme. 2020.
3. IEC 60500:2017 Underwater acoustics - Hydrophones - Properties of hydrophones in the frequency range 1 Hz to 500 kHz.
4. Исаев А. Е., Матвеев А. Н., Поликарпов Н. Г., Щерблюк. Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 56–59.
5. IEC 60565 Ed. 1.0 b: 1977. Calibration of hydrophones.
6. Barrera Figueroa S., Rasmussen K., Jacobsen F. The acoustic center of laboratory standard microphones // J. Acoust. Soc. Am. 2006. Vol. 120(5). P. 2668–2675.
7. IEC 60565-1:2020 Underwater acoustics - Hydrophones - Calibration of hydrophones - Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones.
8. Исаев А. Е., Матвеев А. Н. Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приемника // Акуст. журн. 2010. Т. 56, № 5. С. 651–654.

## АЛГОРИТМ ВЫРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ОТ НЕЖЕСТКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ПРИ НАЛИЧИИ ИСКАЖЕНИЙ ЕЕ ФОРМЫ ВСЛЕДСТВИЕ ТЕЧЕНИЙ

С. И. Рудницкий, В. Ю. Ткачук

НИЦ РЭВ и ФИР ВМФ, Санкт-Петербург, Россия

## ALGORITHM OF PARAMETERIZATION OF SPATIAL PROCESSING OF SIGNALS RECEIVED FROM NONRIGID CYLINDRICAL ARRAY IN PRESENCE OF ITS SHAPE DEFECTS DUE TO CURRENTS

S. I. Rudnitsky, V. Y. Tkachuk

Radio-electronic and information resources Naval Investigation centre, St. Petersburg, Russia

*При нахождении приемной нежесткой цилиндрической антенной решетки (АР) в реальных морских условиях, как правило, имеют место, в частности, ее наклоны, а также повороты вокруг своей оси ее отдельных компонент. Статья посвящена решению задачи расчета параметров алгоритма пространственной обработки в обеспечение возможности формирования веера характеристик направленности указанной АР и его пространственной стабилизации, при работе АР в условиях течений. Приведен пример оценки влияния предложенных алгоритмов на эффективность функционирования позиционного гидроакустического средства, использующего нежесткую цилиндрическую АР.*

*In real sea conditions receiving nonrigid array as a rule has tilts as well as pivot turns of its separate constituent parts. The article is devoted to solving the problem of the parameterization of spatial processing algorithm for providing the possibility of forming of beam pattern fan of specified array and its spatial stabilization in current environment. The example of estimation of influence of suggested algorithms on the performance of positional sonar mean using nonrigid cylindrical array is given.*

**Введение.** Настоящая статья продолжает серию наших публикаций, посвященных разработке существенных элементов теории проектирования цилиндрических антенных решеток (АР) в интересах дальней активной гидролокации в глубоком море, открывшуюся работой [1]. При нахождении цилиндрической АР в море она под действием течений, во-первых, наклоняется, а, во-вторых, ее отдельные элементы дружно или независимо (или частично независимо) вращаются вокруг своей квазивертикальной оси. АР рассматриваемого типа представляет собой совокупность кольцевых антенн, каждая из которых при отсутствии течений расположена горизонтально. При этом вертикальное развитие АР обеспечивается разнесением этих кольцевых антенн по вертикали с фиксированным шагом между смежными кольцевыми антеннами. Указанная АР является по вертикали в общем случае нежесткой. Реализация такого свойства АР фактически вынужденная и является следствием ее значительных волновых размеров с одной стороны и низких рабочих частот с другой. В противном случае практически все преимущества такой АР в сравнении с традиционной планарной АР в части массогабаритных характеристик были бы утрачены. В связи со сказанным, входящие в состав цилиндрической АР кольцевые антенны, как отмечено выше, совершают наклоны и вращения в общем случае сравнительно независимо, например, как показано на рис. 1. При этом АР приходится оснащать совокупностью технических средств (в частности, компасов и инклинометров), на основании показаний которых и осуществляется электронная стабилизация вера ХН АР в пространстве.

Конечной целью решения рассматриваемой задачи является выработка оценок координат каждого из гидрофонов АР. Здесь и далее имеются в виду координаты относительные.

**1. Постановка задачи оценивания параметров наклона каждого из колец АР.** В общем случае наклоны колец АР независимы [2]. Так как кольцо АР имеет жесткую форму, то для простоты будем называть его диском. При этом решение задачи применительно к указанному общему случаю обеспечивает тривиальную возможность его применение в частном случае. Решаемая в настоящей статье задача ставится применительно к следующей модели наклона кольцевой антенны (рис. 2).

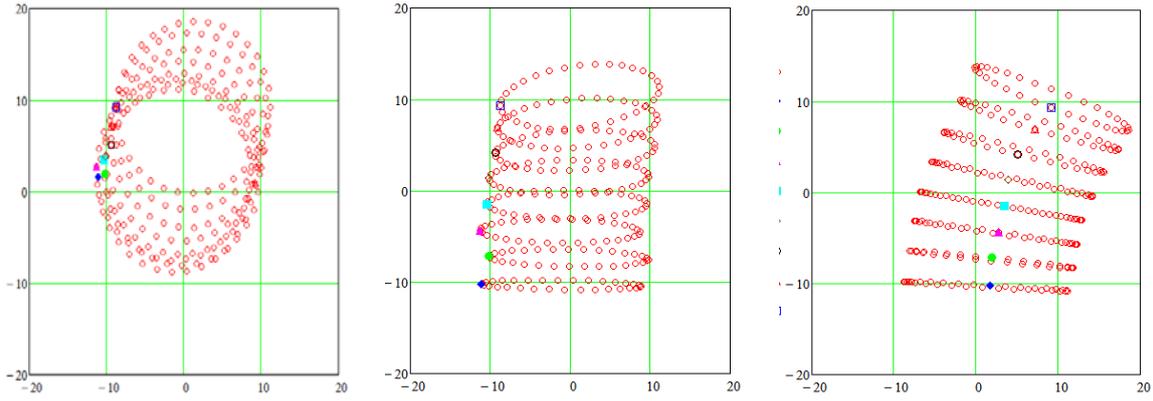


Рис. 1. Аксонометрическая проекция нежесткой цилиндрической антенны с искажениями формы.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

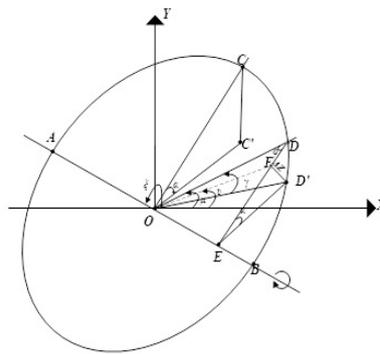


Рис. 2. Иллюстрация к постановке и решению задачи.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Пусть из центра диска проведены радиус-векторы, характеризующиеся угловыми аргументами  $\mu$  (радиус диска  $R$  и начало отсчета углов  $\mu$  несущественны, в данном случае отсчет углов ведется от положительного направления оси абсцисс). Пусть диск наклонен на угол  $\alpha$  так, что в наибольшей степени в вертикальной плоскости наклонен (на этот же на угол  $\alpha$ ) радиус-вектор, характеризующийся отсчитываемым в плоскости диска угловым аргументом  $\xi$ , (нормаль к прямой  $AB$ ). На указанном радиус-векторе, совпадающем с отрезком прямой  $OC$ , расположен инклинометр, определяющий соответствующий угол наклона диска. Требуется определить новые координаты гидрофонов в трехмерной системе координат и угол наклона в вертикальной плоскости  $\gamma$  (точнее  $\gamma(\mu_i)$ ) угол наклона радиус-вектора, характеризующегося произвольным угловым аргументом  $\mu_i$ . Все указанные радиус-векторы расположены в плоскости диска. Значения  $\xi$  и  $\alpha$  (причем  $\alpha = \xi(\mu_{i(0)}=0)$ ) именуем параметрами наклона диска. Задача будет решаться в два этапа. На первом из них будет сделано предположение об известности параметров  $\xi$  и  $\alpha$ , а на втором будет приведено решение задачи оценивания указанных параметров.

**Решение задачи при известных параметрах  $\xi$  и  $\alpha$ .** Решение задачи приводится в редакции, изложенной в [1]. Для дальнейших вычислений рассмотрим треугольники  $EDD'$ ,  $ODE$ ,  $ODF$  и  $OFE$  (рис. 2). Имеем угол  $DED'$  он равен углу  $\alpha$ , поскольку отрезки прямых  $OC$  и  $ED$  перпендикулярны оси вращения диска  $AB$  и расположены в одной плоскости (а именно в той же плоскости, что и диск). Зная координаты гидрофонов в неискаженной антенне, вычисляем направление на каждый гидрофон,  $\mu = \text{arctg}(Y_i / X_i)$ . Определяем угол  $\varphi_i$  для каждого  $nk$ -го диска, (рис. 2, угол  $ODE$ ):  $\varphi_{i,nk} = \xi_{nk} - \mu_{i,nk} - 90$ ,  $\xi_{nk}$  — направление наклона  $nk$ -го диска. Определяем сторону треугольника  $OED$  (рис. 2):  $ED_{i,nk} = R \cdot \cos(\varphi_{i,nk})$ . Вычисляем приращение координат  $\Delta z$  для каждого гидрофона, каждого диска в зависимости от угла  $\alpha_{nk}$ :  $\Delta z_{i,nk} = ED_{i,nk} \cdot \sin(\alpha_{nk})$ . Искомый угол  $\gamma$  определяется как:  $\gamma = -\arccos((2 \cdot R^2 - (DD')^2) / 2 \cdot R^2)$ . Определяем сторону треугольника  $ODF$ :  $FD_{i,nk} = ED_{i,nk} \cdot (1 - \sin(\alpha_{nk}))$ . Определяем стороны

треугольника  $OFE$ :  $EFi_{,nk} = ED_{i,nk} * \cos(\alpha_{nk})$ ,  $OF_{i,nk} = \sqrt{(R^2 + (FD_{i,nk})^2 - 2 * R * FD_{i,nk} * \cos(\varphi_{i,nk}))}$ . Вычисляем угол  $\nu$  в треугольнике  $ODF$ :  $\nu_{i,nk} = \mu_{i,nk} - \arccos((R^2 - (FD_{i,nk}) + (OF_{i,nk})^2) / 2 * R * OF_{i,nk})$ . Угол  $\nu_{i,nk}$  позволяет получить координаты гидрофонов в наклоненных дисках (рис. 2), где:  $R$  — радиус диска;  $nk$  — номер диска цилиндрической антенны,  $\Delta_{повnk}$  — угол поворота  $nk$ -го диска, определяемый по данным встроенных в каждый диск антенны компасов;  $N_0$  — число гидрофонов в диске,  $Z_{nk}$  — аппликата  $nk$ -го диска.

**2. О контроле параметров сдвига колец АР друг относительно друга.** Если в исходном положении (т.е. в отсутствие течений) шаг по вертикали между смежными дисками постоянен и априорно известен, причем все диски располагаются строго одно над (или под) другим, то при наличии течений, имеют место, в частности, сдвиги одного диска относительно другого по горизонтали (рис. 2). В обеспечение возможности вычисления координат гидрофонов предполагается наличие средств контроля текущих расстояний между точками, расположенными в серединах осей вращения указанных колец  $\Delta_{nk}$ , т.е. между точками «О» (рис. 1, 2) разных колец, а также сдвигов между указанными точками по горизонтали  $\Delta x_{nk}$  и  $\Delta y_{nk}$ .

В итоге формируется информация о сдвигах в горизонтальной плоскости каждого  $nk$ -го диска относительно  $nk-1$ -го (или  $nk+1$ -го), где  $nk$  — номер диска. Сдвиги обозначаются как  $\Delta x_{nk}$  и  $\Delta y_{nk}$ . Ниже показано, как эта информация используется при расчете координат гидрофонов АР.

**3. Алгоритм вычисления относительных координат гидрофонов.** Для расчета координат  $i$ -ых гидрофонов каждого кольца в отдельности (с учетом результатов контроля наклона кольца для разных направлений по горизонтали согласно рис. 2:

$$x_{ni,nk} = OF_{i,nk} * \cos(\nu_{i,nk}), y_{ni,nk} = OF_{i,nk} * \sin(\nu_{i,nk}). \quad (1)$$

С учетом результатов контроля сдвигов  $\Delta x_{nk}$  и  $\Delta y_{nk}$  и расстояний  $\Delta_{nk}$  координаты, полученные по формулам (1), преобразовываем в координаты с началом отсчета, общим для гидрофонов всех колец, а именно с началом отсчета в точке «О» нижнего кольца (рис. 2).

$$X_{i,nk} = x_{i,nk} + \Delta x_{nk}; Y_{i,nk} = y_{i,nk} + \Delta y_{nk}; Z_{i,nk} = nk * dz - H / 2 + \Delta z_{i,nk}.$$

Проведем оценку влияния предложенных алгоритмов на эффективность функционирования позиционного гидроакустического средства, использующего в своем составе нежесткую цилиндрическую АР. Определим выражение для вычисления характеристики направленности АР:

$$RA(\Theta, \phi, \Theta_0, \phi_0, f) = \frac{1}{N} \sum_{N=0}^{N-1} (AA_i \cdot e^{-j \cdot Phase(x,y,z,\Theta,\phi,\Theta_0,\phi_0,f)}), \quad (2)$$

где  $N$  — число гидрофонов в АР;  $AA_i$  — весовые коэффициенты (в нашем случае  $AA_i=1$ );  $x, y, z$  — декартовы координаты гидрофонов АР;  $\Theta$  — угол в вертикальной плоскости;  $\Theta_0$  — угол компенсации в вертикальной плоскости;  $\phi$  — угол в горизонтальной плоскости;  $\phi_0$  — угол компенсации в горизонтальной плоскости;  $f$  — рабочая частота;  $C$  — скорость звука в воде;

$$Tau(x, y, z, \Theta, \phi) = \frac{1}{C} \cdot (x \cdot \sin(\Theta) \cdot \cos(\phi) + y \cdot \sin(\Theta) \cdot \sin(\phi) + z \cdot \cos(\Theta)); \quad (3)$$

$$Phase(x, y, z, \Theta, \phi, \Theta_0, \phi_0, f) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (Tau(x, y, z, \Theta, \phi) - Tau(x, y, z, \Theta_0, \phi_0)). \quad (4)$$

Выражение для вычисления коэффициента помехоустойчивости АР в изотропном поле помех при ориентации главного максимума ХН АР в направлении  $\Theta_0, \phi_0$ , на частоте  $f$ :

$$\gamma(\Theta_0, \phi_0, f) = \frac{4\pi}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} (RA(\Theta, \phi, \Theta_0, \phi_0, f))^2 \sin(\Theta) d\Theta} \quad (5)$$

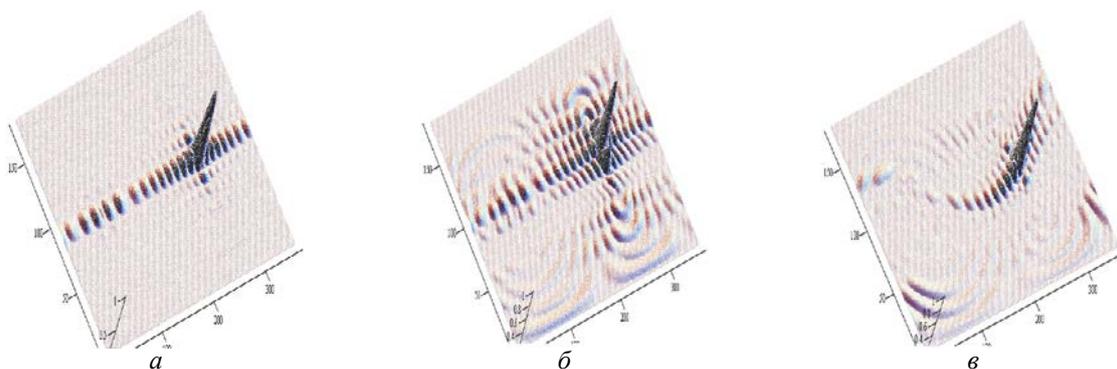


Рис. 3. Трехмерное изображение характеристики направленности.

*a* — при отсутствии искажений формы в цилиндрической АР; *б* — при наличии искажений формы цилиндрической АР; *в* — при наличии искажений формы цилиндрической АР с использованием предлагаемых алгоритмов.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

На рис. 3 представлено трехмерное изображение характеристики направленности в координатах угол по вертикали, угол по горизонтали вычисленное в соответствии с выражениями (2)–(4). С учетом полученной формы характеристики направленности выполнены расчеты значений коэффициента помехоустойчивости АР в соответствии с выражением (5), дальности обнаружения и площади зоны обнаружения подводных объектов позиционным гидроакустическим средством (ПГАС), использующим нежесткую цилиндрическую АР.

Результаты расчетов показывают:

- для цилиндрической АР при отсутствии искажения ее формы значение коэффициента помехоустойчивости имеет значение 240;
- для цилиндрической АР при наличии искажения ее формы, как показано в примере искажений (рис. 1), в следствие течений и других факторов, значение коэффициента помехоустойчивости равно 119, а также наблюдается смещение главного максимума характеристики направленности в вертикальной плоскости на  $10^{\circ}$ – $12^{\circ}$ ;
- для цилиндрической АР при наличии искажения ее формы, как показано в примере искажений (рис. 1), с использованием предлагаемых алгоритмов значение коэффициента помехоустойчивости повышается до значения 201, а также происходит восстановление положения главного максимума характеристики направленности;
- площадь зоны обнаружения цилиндрической АР при наличии искажений ее формы уменьшается на 19,2 % при летнем типе гидрологии, и на 22 % при зимнем типе гидрологии, по сравнению с цилиндрической АР при отсутствии искажений;
- при применении разработанных алгоритмов площадь зоны обнаружения уменьшается только на 5,4 %, при летнем типе гидрологии, и на 6,1 % при зимнем типе гидрологии, по сравнению с цилиндрической АР при отсутствии искажений.

Снижение площади зоны обнаружения более, чем на 10 %, соответствии с принятым тактическим критерием отказа, является «Отказом» ПГАС. Использование предложенных алгоритмов переводит ПГАС из состояния «Отказ» в работоспособное состояние.

**Выводы.** 1) Получены соотношения для расчетов параметров наклона каждого из колец АР, параметров вращения каждого кольца, а также параметров сдвига колец АР друг относительно друга. 2) На основе указанных соотношений для расчетов описан алгоритм вычисления относительных координат гидрофонов АР; владение методикой расчетов указанных относительных координат гидрофонов АР, в свою очередь, обеспечивает возможность компенсации АР на каждое актуальное направление обзора, т.е. возможность формирования статического веера ХН в тракте обзора гидроакустического комплекса.

### Литература

1. Голубев А. Г., Рудницкий С. И., Сущенков Д. А., Ткачук В. Ю. О качестве пространственной фильтрации вариантов цилиндрических антенн, рассчитанных на реализацию в составе СГАК дальнего действия // Сб. тр. ВУНЦ «Военно-морская академия». 2020.
2. Ширман Я. Д. Радиозлектронные системы // Справочник. М.: ЗАО «Маквис», 1998.

## ОПТИМАЛЬНОЕ СОЧЕТАНИЕ ПОРОГОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПО УРОВНЮ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ В ПАССИВНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ОБНАРУЖИТЕЛЕ

Р. И. Горбачев, С. Б. Егоров<sup>1</sup>, канд. техн. наук

АО «НТЦ «Электрозонд», Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

## OPTIMAL COMBINATION OF LEVEL AND TIME DETECTION THRESHOLDS IN A PASSIVE ACOUSTIC DETECTOR

R. I. Gorbachev, S. B. Egorov<sup>1</sup>, Ph.D.

JSC «NTC «Electrozond», St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

*В работе изложена методика определения оптимального сочетания величин двух порогов в пассивном обнаружителе — по уровню и длительности. Критерием оптимальности является максимум аппаратной чувствительности обнаружителя, эквивалентный критерию Неймана-Пирсона. Задача оптимизации решается с привлечением вероятностных характеристик ожидания и обнаружения сигнала, полученных для случая нормализации помехового и сигнально-помехового индикаторных процессов.*

*This paper describes a method for determining the optimal combination of two thresholds in a passive detector in terms of level and duration. The optimality criterion is the maximum sensitivity of the detector, which is equivalent to the Neumann-Pearson criterion. The optimization problem is solved with the involvement of the probabilistic characteristics of signal waiting and signal detection obtained for the normalized noise only and signal with noise indicator processes.*

**Введение.** Для снижения вероятности ложной тревоги на интервале ожидания сигнала в автоматическом пассивном обнаружителе вводят в дополнение к порогу обнаружения сигнала по уровню порог обнаружения по длительности.

Применение двух порогов позволяет обеспечить одно и то же значение вероятности ложной тревоги  $P_{ЛТ}$  на интервале ожидания сигнала  $T_0$ , величину  $P_{ЛТ}(T_0)$ , при разных сочетаниях порогов обнаружения по уровню  $u_0$  и длительности  $\tau_0$ . Разный характер влияния порога по длительности на вероятность ложной тревоги  $P_{ЛТ}(T_0)$  и вероятность правильного обнаружения  $P_{ПО}(t_M)$  сигнала движущегося источника шумоизлучения (в момент  $t_M$  его выхода на направление оси ХН приемной антенны) позволяет искать оптимальное значение величины  $\tau_0$ . При заданных параметрах  $T_0$  и  $P_{ЛТ}(T_0)$  критерием оптимальности является критерий Неймана-Пирсона. При найденной оптимальной величине  $\tau_0$ , определяется порог  $u_0$ , который в сочетании  $\tau_{0opt}$  обеспечивает заданное значение  $P_{ЛТ}(T_0)$ . Так определяется оптимальное сочетание двух порогов. Для решения поставленной задачи изложенным путем необходимы соотношения, связывающие  $P_{ЛТ}(T_0)$  и  $P_{ПО}(t_M)$  с порогом  $u_0$  и  $\tau_0$ . Такими соотношениями являются вероятностные характеристики ожидания и обнаружения сигнала.

**Вероятностные характеристики ожидания и обнаружения сигнала в пассивном обнаружителе с нормализованным индикаторным процессом.** Вероятностная характеристика ожидания сигнала — это зависимость вероятности ложной тревоги  $P_{ЛТ}(T_0)$  на интервале ожидания сигнала от длительности интервала ожидания  $T_0$  и порогов обнаружения  $u_0$  и  $\tau_0$ . Вероятностная характеристика обнаружения — это зависимость вероятности обнаружения сигнала  $P_{ПО}(t_M)$  от отношения сигнал/помеха по мощности на выходе приемного тракта в момент обнаружения  $t_M$  и от порогов  $u_0$  и  $\tau_0$ . Аналитические модели обеих характеристик получены при следующих условиях:

- индикаторные процессы на выходе последетекторного фильтра нижних частот (ФНЧ) — помеховый  $u_n(t)$  и суммарный сигнально-помеховый  $u_{\Sigma}(t)$ , — нормализованы;
- помеховый индикаторный процесс стационаризован в приемном тракте на всем интервале ожидания, а суммарный является процессом с медленной нестационарностью [1], допускающий локально стационарное приближение на всей проходимой характеристике источника, в том числе на интервале  $\tau_0$  вблизи момента  $t_M$ .

При выводе выражений для обеих характеристик использованы функции распределения вероятностей на интервале времени нормального стационарного случайного процесса [2].

Вероятностная характеристика ожидания получена на основании «выбросовой» вероятностной трактовки работы обнаружителя в режиме ожидания сигнала [3]. В этой трактовке  $P_{\text{ЛТ}}(T_0)$  — вероятность появления хотя бы одного выброса помехового индикаторного процесса  $u_n(t)$  выше уровня  $u_0$ , имеющего длительность  $\tau \geq \tau_0$  на этом уровне.

Приближенное выражение для указанной характеристики, справедливое при  $k \geq 3$ , имеет вид:

$$P_{\text{ЛТ}}(T_0) = 1 - \exp\left(-f_{\text{ин}} T_0 \exp\left(-\frac{k^2}{2} - \sqrt{2\pi} k x\right)\right), \quad (1)$$

где

$$k = \frac{u_0 - \mu_{\text{ин}}}{\sigma_{\text{ин}}} \quad (2)$$

— относительный порог обнаружения по уровню;

$$x = f_{\text{ин}} \tau_0 \quad (3)$$

— относительный порог обнаружения по длительности;

$$f_{\text{ин}} T_0 \quad (4)$$

— относительное время ожидания сигнала;  $\mu_{\text{ин}}$ ,  $\sigma_{\text{ин}}$ ,  $f_{\text{ин}}$  — соответственно математическое ожидание, среднее квадратичное отклонение (СКО) и средняя квадратичная частота (СКЧ) флюктуаций помехового индикаторного процесса  $u_n(t)$ .

СКЧ флюктуаций процесса  $u_n(t)$  связана с его нормированной автокорреляцией  $R_{\text{ин}}(\tau)$  соотношением [2]

$$f_{\text{ин}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-R_{\text{ин}}''(0)} \quad (5)$$

Вероятностная характеристика обнаружения сигнала для значений  $P_{\text{ПО}}(t_M) > 0,5$  определяется выражением:

$$P_{\text{ПО}}(t_M) = \Phi(k_{\Sigma}) \exp\left(-\frac{x}{\Phi(k_{\Sigma})} \exp\left(-\frac{k_{\Sigma}^2}{2}\right)\right), \quad (6)$$

где

$$\Phi(k_{\Sigma}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{k_{\Sigma}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad \text{— интеграл вероятности;}$$

$$k_{\Sigma} = k_{\Sigma}(t_M) = \frac{q^2(t_M) \sqrt{b} - k}{1 + q_M^2(t_M)}; \quad (7)$$

$$q^2(t_M) = \frac{\sigma_{\Phi_s}^2(t_M)}{\sigma_{\Phi_n}^2} \quad (8)$$

— отношение дисперсий шумового сигнала  $\sigma_{\Phi_s}^2(t_M)$  и шумовой помехи  $\sigma_{\Phi_n}^2$  на выходе приемного тракта, т. е. на выходе полосового преддетекторного фильтра — отношение сигнал/помеха (ОСП);

$$b = \frac{T_s}{4\tau_{kn}} \tag{9}$$

— относительная эквивалентная длительность сигнала;

$$T_s = \frac{\left( \int_0^{t_M} h(\tau) \mu(t_M - \tau) d\tau \right)^2}{\int_0^\infty h^2(\tau) d\tau} ; \tag{10}$$

— эквивалентная длительность сигнала

$$\mu(\tau) = \frac{\sigma_{\Phi_s}^2(\tau)}{\sigma_{\Phi_s}^2(t_M)} \tag{11}$$

— нормированная проходная характеристика источника сигнала на выходе приемного тракта;

$$\tau_{kn} = \int_0^\infty R_{kn}(\tau) d\tau \tag{12}$$

— эквивалентная длительность нормированной автокорреляции помехового процесса на выходе квадратора;  $h(\tau)$ — импульсная характеристика последетекторного ФНЧ.

**Взаимосвязь порогов обнаружения по уровню и по длительности.** Вероятностная характеристика ожидания (1) при известном времени ожидания  $T_0$  и заданной на нем величине  $P_{\text{ЛТ}}(T_0)$  является уравнением, связывающим значения  $k$  и  $x$ . Задавая значения  $x$  в диапазоне  $0 \leq x < f_{\text{ин}}T_0$  (ограничение следует из физического смысла параметров  $T_0$  и  $\tau_0$ ) и решая уравнение (1) относительно  $k$ , получаем параметрические функции  $k(x)$ . На рис. 1 приведено семейство графиков этой функции при  $P_{\text{ЛТ}}(T_0) = 10^{-3}$  и ряде значений относительного времени ожидания сигнала  $f_{\text{ин}}T_0$ .

Графики показывают, что  $k(x)$  всегда уменьшается с ростом  $x$ . При этом, максимальное значение  $k$  при  $x=0$  определяется согласно (1) выражением:

$$K(0) = \sqrt{2 \ln \frac{f_{\text{ин}}T_0}{P_{\text{ЛТ}}(T_0)}} \tag{13}$$

Вероятностная характеристика обнаружения (6) при заданной величине  $P_{\text{ПО}}(t_M)$  является уравнением позволяющим установить функциональную зависимость  $k_\Sigma$  от  $x$ . На рис. 2 приведено семейство графиков функции  $k_\Sigma(x)$  при трех значениях  $P_{\text{ПО}}(t_M)$

$$k_\Sigma(0) = \arg \Phi(P_{\text{ПО}}(t_M)) \tag{14}$$

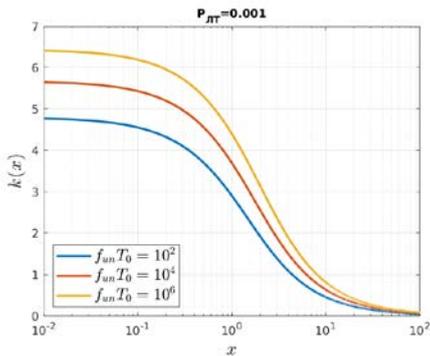


Рис. 1. График зависимости  $k(x)$ .

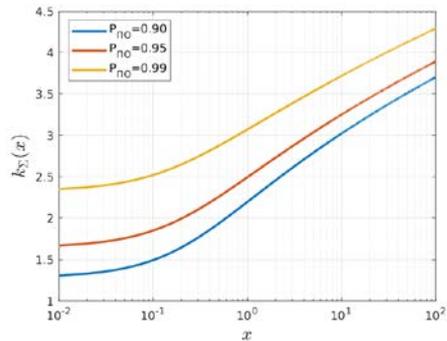


Рис. 2. График зависимости  $k_\Sigma(x)$ .

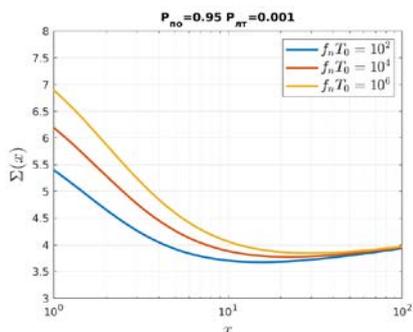


Рис. 3. График зависимости  $\Sigma(x)$ .

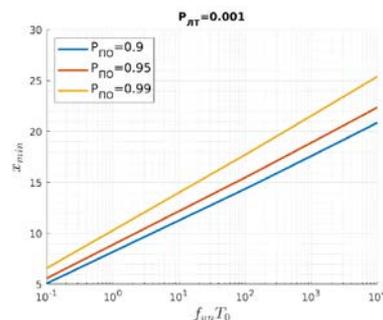


Рис. 4. График зависимости  $x_{\min}(f_{in}T_0)$ .

**Аппаратная чувствительность обнаружителя и оптимальное значение порога по длительности.** Оптимизация обнаружителя по критерию Неймана-Пирсона предполагает максимум  $P_{\text{по}}(t_M)$  при фиксированном значении  $P_{\text{лт}}(T_0)$ . Но, как правило, заданными являются обе эти вероятности. В этом случае практически удобным является критерий оптимальности — «минимум ОСП», при котором обеспечивается заданная  $P_{\text{по}}(t_M)$  при известной постоянной  $P_{\text{лт}}(T_0)$ . Такое ОСП называется пороговым и служит мерой чувствительности обнаружителя. Если пороговое ОСП оценивается внутри схемы обнаружителя, логично назвать его «аппаратной чувствительностью». Когда из (1) и (6) определены значения  $k(x)$  и  $k_{\Sigma}(x)$ , соотношение (7) становится уравнением относительного ОСП, при котором обеспечивается заданное  $P_{\text{по}}(t_M)$ :

$$q^2(t_M) = \frac{k_{\Sigma}(x) + k(x)}{\sqrt{b} - k_{\Sigma}(x)} \quad (15)$$

Учитывая, что величина  $\sqrt{b}$  в пассивных обнаружителях меняется от нескольких десятков до нескольких сотен, а  $k_{\Sigma}(x) \leq 4$ , делаем вывод, что оптимальным по критерию «максимум аппаратной чувствительности» является такое значение  $x$ , при котором сумма минимальна.

$$\Sigma(x) = k_{\Sigma}(x) + k(x)$$

На рис. 3. Приведены графики функции  $\Sigma(x)$  при  $P_{\text{по}}(t_M) = 0,95$  и  $P_{\text{лт}}(T_0) = 10^{-3}$ , и разных значениях  $f_{in}T_0$ . Графики показывают, что оптимальные значения  $x$  лежат в диапазоне от 5 до 25 и растут с увеличением  $f_{in}T_0$ . Зависимость  $x_{\min}$  от  $\ln(f_{in}T_0)$  близка линейной (рис. 4). При  $P_{\text{лт}}(T_0) \leq 10^{-2}$  уравнение (1) относительно  $k(x)$  упрощается до квадратного с решением

$$k(x) = \sqrt{2 \ln \frac{f_{in}T_0}{P_{\text{лт}}(T_0)} + 2\pi x^2} - \sqrt{2\pi} x \quad (16)$$

Следовательно, определив  $x_{\min}$ , из (16) определяем  $k(x_{\min})$ . Абсолютные величины порогов  $u_0$  и  $\tau_0$  получаем из (2) и (3).

Таким образом завершаем решение задачи нахождения оптимального сочетания порогов по уровню и длительности.

### Литература

1. Егоров С. Б., Горбачев Р. И. Аналитическая модель шумового сигнала с медленной спектрально-амплитудной модуляцией для пассивного шумолокатора // Тр. СПбГМТУ. 2020. Т. 1, № 52.
2. Денисенко А. Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника // Справочное пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2005.
3. Егоров С. Б., Горбачёв Р. И. Определение порогов селекции по уровню и длительности в обнаружителях с нормализованным индикаторным процессом // Морские интеллектуальные технологии. 2020. Т. 2, № 2(48).

## КРАТКИЙ ПЕРЕЧЕНЬ ФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ, НАБЛЮДАВШИХСЯ В ОБЛАСТИ ГИДРОАКУСТИКИ

*В. Б. Железный*

АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## BRIEF LIST OF PHYSICAL ANOMALIES OBSERVED IN HYDROACOUSTICS

*V. B. Zheleznyi*

JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Гидроакустика как техническая область базируется на хорошо развитых знаниях в областях акустики, океанологии и приборостроении, поэтому в случаях появления существенных отклонений от ожидаемых в гидроакустике результатов их можно относить к аномальным. Приводится краткий перечень наблюдавшихся в области гидроакустики аномальных результатов и эффектов.*

*Hydroacoustics as a technical domain based on well-developed knowledge of acoustics, oceanology and instrumentation; therefore, in cases where significant deviations from the results expected in hydroacoustics appear, they can be classified as anomalous. A short list of anomalous results and effects is given.*

Понятие аномальных явлений используется достаточно широко и применяется, как к редким отклонениям параметров каких-либо природных процессов, имеющих достаточно достоверные научные объяснения (например, аномально жаркая погода), так и к природным или физическим явлениям, не вписывающимся в научную парадигму. Поэтому в данном материале под термином «аномальные явления» будем понимать объективно наблюдаемые физические или природные явления, наблюдаемые параметры которых не вписываются в современную научную парадигму. Отметим, что важен не только факт наблюдения аномального явления (или физической аномалии), но и обоснование того, что наблюдаемое явление имеет заметные отклонения от ожидаемых в рамках существующих научных описаний. В этом плане гидроакустика, как техническая область, имеющая развитые теоретические основы и базирующаяся на знаниях по акустике, океанологии и приборостроении, позволяет хорошо выявлять аномальные явления.

На уровне знаний 1940-х гг. к аномальному явлению относилось явление сверхдальнего распространения низкочастотного (НЧ) звука в глубоких морях. Проведение исследований этого явления позволили академику Л. М. Бреховских в 1946 г. экспериментально обнаружить существования подводного звукового канала в Японском море, а затем и построить теорию распространения волн в неоднородных слоистых средах, давшую научное обоснование явления. Интересно отметить, что при этом хотя это явление и перестало быть аномальным, сам термин «аномалия распространения звука» в гидроакустике остался [1].

К настоящему времени в области гидроакустики и океанологии было выявлено более десятка случаев проявления аномальных отклонений от ожидаемых результатов, но поскольку большинство из них не могли быть применены для развития гидроакустической техники, то к ним был проявлен незначительный интерес. При этом упускается то, что любой зафиксированный аномальный результат может оказаться полезным для развития знаний о природе, а иногда при понимании причин проявления аномальных результатов и для развития техники. Поэтому на данном этапе представляется целесообразным дать краткий перечень основных аномальных явлений, выявленных в акустике океана и гидроакустике.

1. Ладожские «бронтиды». Наблюдаемые в течение нескольких веков в основном на западном и юго-западном берегу острова Валаам эпизодические громopodobные звуки, называемые Ладожскими «бронтидами» [2], несомненно, относятся к аномальным акустическим явлениям. И хотя в настоящее время усилия были сосредоточены на изучении микросейсмической активности Ладожского региона [2], следует обратить внимание на то, что в ряде случаев наблюдатели указывали в качестве источников «бронтид» саму водную поверхность озера, а иногда и отмечали бурления участков озера во время появления «бронтид». Это указывает на то, что появление «бронтид» может также сопровождаться акустическими процессами в самом озере. Таким образом, при продолжении исследований Ладожских «бронтид» представляется желательным дополнить сейсмическое оборудование установкой в

озере гидроакустических средств, например, несколькими векторно-фазовыми приемниками и группой антенн пассивного определения дистанции до источников звука.

В середине 1970-х гг. автор сам наблюдал на о. Валаам несколько «бронтид» в ясный солнечный безветренный день (на следующий день начался сильный шторм и пошел дождь). Характерно, что эти звуки в тот день слышали только находившиеся на юго-западном берегу острова туристы, а находившиеся в северо-западной части и центре Валаама, на теплоходах в Монастырской бухте и возле этой бухты, никаких громоподобных звуков не слышали. Теоретически такое могло быть, если процессы, формировавшие такие «бронтиды», фазировались по типу антенны бегущей волны или параметрической излучающей антенны.

Так же при рассмотрении гипотез о причинах появления «бронтид» следует учитывать новые данные о возможном коллективном влиянии микроструктур реальной воды, например, таких, как клатраты Домрачева-Селивановского [3] или электрически заряженных вакуумных пузырьков, лавинный переход которых из одного состояния в другое гипотетически может вызывать высвобождение энергии в акустической форме.

2. Звуки океана непонятного происхождения. В начале 1960-х гг. после установки ВМС США первых гидрофонов систем гидроакустического наблюдения в Атлантическом и Тихом Океане, кроме сигналов техногенного и биологического происхождения, в диапазоне от единиц до нескольких сот Гц стали фиксироваться аномальные сигналы неизвестного происхождения. Так в [1] представлено описание тонально импульсных сигналов с частотой заполнения 20 Гц, длительностью импульса около 1 с, частотой повторения около 10 с, излучавшихся сериями от 6 до 25 мин при акустической мощности излучения от 1 до 25 Вт. Указанные сигналы проявлялись во многих регионах и до сих пор их происхождение не нашло объяснения.

В дальнейшем с развитием систем гидроакустического наблюдения, специалистами NOAA (США) были обнаружены и другие аномальные сигналы (названные NOAA по их характерному звучанию Bloop, Slow Down, Upsweep, Whistle и др.), появление которых также не нашло приемлемого объяснения. Надо отметить, что в качестве гипотезы возникновения таких сигналов, также следует учитывать возможность выделения акустической энергии ансамблями микроструктур морской воды при переходе их из одного состояния в другое, где в качестве толчка начала процесса могут выступать микросейсмические воздействия.

3. «Квакеры». С 1960-х гг. XX в. сперва крайне изредка, а в 1970-1980-х гг. несколько более часто гидроакустиком при прослушивании морских шумов на подводных лодках (ПЛ) в режиме шумопеленгования стали эпизодически наблюдаться звуковые явления неизвестного происхождения, часть из которых вследствие сходства с коллективным кваканьем лягушек получили название «квакеров». Несмотря на большой объем сведений о характере проявления «квакеров» и большое количество сообщений в СМИ, по данному явлению до 2020 г. не было ни одной научной публикации. Первая научная публикация вышла в 2020 [4], в которой было проведено обособление явления «квакеров» от других неустановленных звуковых излучений (НЗИ) и, по имевшимся сведениям, показано, что звуки «квакеров» могли формироваться вблизи обтекателей антенн гидроакустических станций, а в качестве источника звука могли выступать отдельные микроструктурные образования реальной морской воды, которые под воздействием мощных гидродинамических полей ПЛ могли переходить из одного состояния в другое или распадаться с выделением части энергии в виде звука. Для выявления существования таких «активных» микроструктур в море в [4] было предложено использовать методические наработки [5] по обнаружению избыточно затянутой реверберации (ИЗР).

Если же предполагать возможность биологического происхождения звука «квакеров», то следует обратить внимание на колонии диатомовых панцирных водорослей [6]. У самих диатомей излучения звука не отмечалось, но их многие виды способны образовывать в море колонии длиной до нескольких десятков километров (в виде нитей, матов, клубков), путем сцепления молекулярными нитями и выступами [6], и при «столкновении» ПЛ с такой колонией диатомей, разрыв механических связей между диатомеями, потенциально может привести к эмиссии звука. Колонии диатомей также могут собирать и удерживать неорганические и органические соединения и возможно микроструктурные образования воды, которые при разрушении колонии тоже могут потенциально стать источниками эмиссии звука.

4. Избыточно затянутая по времени реверберация (ИЗР). Редкое эпизодическое аномальное явление, фиксировавшееся в 1980-е годы три раза [5] в нескольких десятках экспериментов,

проводимых в местах, где наблюдалось другое эпизодическое аномальное явление [7]. Обнаруженная ИЗР характеризовалась наблюдением незначительного спада сигнала реверберации (со спадом 15 дБ за 100 с), начиная с 30-й секунды после выключения длительного тонального сигнала (длительностью около  $10^3$  с) на частоте 16 кГц [5]. Учитывая, что в морских условиях реверберация носит сложный характер, в [5] также были получены формулы (критерии) для определения, является ли наблюдаемая реверберация аномально длительной или соответствует классической теории распространения звука в морских условиях. В качестве механизма образования ИЗР можно предположить, что при определенных условиях в морской воде образуются ансамбли микроструктур, способных накапливать энергию при воздействии длительного тонального сигнала накачки и отдавать ее на той же частоте после выключения сигнала накачки небольшими частями, что и может привести к ИЗР. Следует отметить, что в лабораторных исследованиях уже наблюдалось появление длительного испускания водой фотонов после длительной обработки воды ультразвуком, однако длительная эмиссия звука на частоте накачки после выключения накачки носит более необычный характер. Поскольку микроструктурные состояния морской воды трудно предсказуемы, то заранее неизвестно удастся ли повторить результаты [5] в настоящее время, однако простота поиска ИЗР и возможность применения для него существующих приемо-излучающих систем позволяет проводить поиск ИЗР в рамках других работ без дополнительных затрат.

5. Эпизодическое появление аномально высокой амплитудной модуляции (АМ) сигнала реверберации накачки, возникающей при встречном взаимодействии высокочастотного (ВЧ) акустического сигнала накачки с НЧ акустическим сигналом в зоне формирования обратного рассеяния сигнала накачки в дальнем поле реверберационной приемной параметрической антенны (РППА). Данное явление хорошо описано в [7], там же даны спектры и осциллограммы наблюдаемого явления и формулы, доказывающие аномальный характер этого явления, а также показана невозможность получения модуляционных гармоник такого гигантского уровня в рамках существующей теории параметрического приема. В целом РППА относятся к сложным системам, при их создании предъявляются требования обеспечения высокого динамического диапазона, низкого уровня собственных нелинейных искажений, контроля этих уровней [7]. Также работоспособность РППА сильно зависит от природных условий и попадания в приемный тракт паразитных сигналов на частоте накачки [7]. Механизм большой АМ реверберации никак не может быть объяснен в рамках акустики, а потому остается только возможность его появления за счет участия в формировании АМ модуляции каких-либо слабо изученных микроструктур реальной воды, перечень которых приведен в [7].

Таким образом РППА ныне представляет ценность не как система шумопеленгования, а как гидроакустическое средство выявления в морских условиях областей с присутствием структур, обладающих необычным энергетическим обменом в акустических полях [7]. Особенно в данном явлении интересен эпизодический характер проявления данного аномального явления, показывающий, что в море могут встречаться области микроструктур воды, различающиеся по характеру нелинейного реагирования на комбинированные акустические поля.

6. Явление потери акустического давления при формировании униполярной волны сжатия в воде импульсным электродинамическим излучателем (ИЭДИ). При проведении исследований акустических униполярных волн сжатия с плоским фронтом, формируемых ИЭДИ в ударной трубе, было обнаружено, что пиковое давление в воде при сжимающих пиковых усилиях на поршне ИЭДИ ниже 20 МПа было в несколько раз меньше сжимающих усилий со стороны поршня ИЭДИ [8, 9]. Как отмечалось в [8, 9], указанное значительное отклонение могло быть вызвано затратами части энергии ИЭДИ на изменение энтропии реальной воды при ее импульсном сжатии, то есть преодолением энтропийных сил.

Следует отметить, что влияние энтропийной упругости воды может также частично являться причиной расхождения значений к.п.д. электроакустических преобразователей, измеренных на основе импедансного и прямого методов, из-за перераспределения энергии, передаваемой электроакустическим преобразователем в воду, между энергией акустического поля и энергией, затраченной на возмущения энтропии воды относительно равновесного состояния [10].

Также следует учитывать, что электрические генераторы с использованием импульсных технологий формирования сигналов ключевыми усилителями мощности (КУМ), в отличие от

генераторов с линейным усилением, формально не образуют линейную электрическую цепь в составе системы «генератор с КУМ — электроакустический преобразователь». Поэтому взаимодействие такой системы с водной средой может приводить к отличиям параметров излучаемого акустического поля от параметров акустических полей, генерируемых при использовании линейных генераторов (генераторов класса А). В частности, в сопоставительных экспериментах [11] уже была выявлена заметная потеря чувствительности в излучении при использовании генератора с формированием гармонических сигналов на основе усилителя-ограничителя, фазоимпульсного преобразователя и двухканального КУМ [12].

Очевидно, что такие эффекты как потеря чувствительности в излучении потенциально могут снижать эффективность применения излучателей. Поэтому явно необходимо при применении генераторов с КУМ сопоставлять значение чувствительности в излучении при использовании генераторов с КУМ с значение чувствительности в излучении при использовании традиционного линейного измерительного генератора класса А, а также контролировать различия форм акустического сигнала и форм напряжения и тока, как это было выполнено в [11]. Потенциально это действия позволят обеспечить поиск путей совершенствования генераторов с КУМ в целях повышения эффективности излучающих трактов, а также обеспечат накопление научных данных о проявлении реакций реальной воды при применении различных гидроакустических систем формирования акустического поля на основе использования генераторов с КУМ.

7. Общее замечание о пользе исследования аномальных явлений в гидроакустике.

В целом развитие исследований аномальных явлений с использованием гидроакустической техники может не только продвинуть фундаментальные знания о воде и природе появления аномальных акустических сигналов с необычными характеристиками, но и способствовать развитию гидроакустической техники. Так, например, исследования Ладожских «бронтид» с использованием векторно-фазовых акустических приемников позволит не только обнаруживать сопутствующие «бронтидам» акустические колебания и потоки энергии, но и позволит в ходе этих исследований совершенствовать применение векторно-фазовых методов в гидроакустике путем наблюдения за другими природными и техногенными источниками звука в уникальных условиях Ладожского озера.

### *Литература*

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978.
2. Ассиновская Б. А., Карпинский В. В. Ладожские сейсмические явления / СПб: изд-во ВСЕГЕИ, 2020.
3. Домрачев Г. А., Селивановский Д. А., Домрачева Д. Г., Домрачева Л. Г., Лазарев А. И., Стунжас П. А., Шишканов С. Ф., Вакс В.Л. Роль нейтральных дефектов в структурной химии жидкой воды // Жур. структурной химии. 2004. Т. 45, № 4. С. 670–677.
4. Железный В. Б. Формализация проблемы эпизодического проявления "Квакеров" // Тр. XV Всеросс. конф. «Прикл. технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2020. С. 431–434.
5. Железный В. Б. Возможности использования гидроакустической техники для выявления свойств микроструктур в реальной воде // Тр. XII Всеросс. конф. «Прикл. технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2014. С. 549–551
6. Стунжас П. А., Сапожников Ф. В. Эти удивительные диатомеи // Природа. 2000. № 5. С. 12–18.
7. Железный В. Б. Проблемы применения реверберационных параметрических приемных антенн // Гидроакустика. 2018. Вып. 34(2). С. 5–19.
8. Железный В. Б. О формировании волны сжатия в жидкости импульсным электродинамическим излучателем // Судостроительная промышленность. Сер. «Общетеchnическая». 1992. Вып. 37. С. 35–42.
9. Железный В. Б. Исследование параметров волны сжатия, формируемой импульсным электродинамическим излучателем в воде // Тр. VI межд. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики – ГА-2002». СПб.: ФГУП ЦНИИ «Гидроприбор», 2002. С. 163–168
10. Zhelezny V. Investigation of interaction between sound sources and non-adiabatic medium // Proc. of the 11-th Int. Congress on Sound and Vibration. St. Petersburg. 2004. P. 3579–3586
11. Железный В. Б. О влиянии усилителей мощности на параметры электроакустических преобразователей энергии // Тр. VIII межд. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики – ГА-2006». СПб.: Наука, 2006. С. 372–377
12. Александров В.А., Островский Д. Б., Сиверс М.А. Параметрические излучающие тракты // Тр. учебных заведений связи / СПбГУТ. СПб.: 2000. № 166. С. 129–138.

## ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РЫБ В САДКАХ РЫБОВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ

*М. Ю. Кузнецов*, канд. техн. наук, *И. А. Убарчук*, *В. И. Поляничко*  
Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»), Владивосток, Россия

## HYDROACOUSTIC MONITORING OF FISH IN FISH FARMING CAGES

*M. Y. Kuznetsov*, Ph.D., *I. A. Ubarchuk*, *V. I. Polyanichko*  
Pacific Branch of FSBSI «VNIRO» («TINRO»), Vladivostok, Russia

*Рассматриваются алгоритмические и технологические аспекты применения гидроакустического эхоинтеграционного метода для дистанционного мониторинга рыб в выростных садках рыбоводных хозяйств. Анализируются факторы, влияющие на точность оценки численности рыб в садке, выявлены оптимальные условия измерений. Приводятся результаты исследования отражающих свойств и оценки численности рыб в садке при различной их плотности и условиях измерений.*

*Algorithmic and technological aspects of the application of hydroacoustic echo-integration method for remote monitoring of fish in growing cages of fish farms are considered. The factors influencing on the accuracy of number estimating of fish in the cage are analyzed, optimal measurement conditions are identified. The results of the reflective properties and number estimates of fish in cage at different densities and measurement conditions are presented.*

Гидроакустические технологии широко используются для океанологических исследований и мониторинга биоресурсов океана. В числе их преимуществ - дистанционность зондирования водной толщи и оперативность получения информации о характеристиках пространственного распределения и плотности находящихся там биологических объектов. С развитием гидроакустической техники и технологий цифровой обработки эхосигналов, расширяется список объектов и сфер применения гидроакустики в рыбном хозяйстве. Например, для решения задачи бесконтактного (неинвазивного) определения и контроля численности и биомассы рыбы в выростных садках и водоемах предприятий аквакультуры. В последние годы для этого предлагаются различные методы и технические средства. Среди них: оптические, индукционные, методы машинного зрения, ДНК-методы, а также средства пассивной и активной гидроакустической локации [1].

Акустические технологии, в отличие от оптических, хорошо работают в любых средах обитания рыб, в т.ч. с низкой видимостью и в полной темноте. Звуковые волны в воде затухают гораздо слабее, чем электромагнитные и распространяются на более значительные расстояния. Кроме этого, существует возможность непрерывного контроля состояния и распределения рыб с использованием автономно работающих регистрирующих систем. Для этого в Тихоокеанском филиале ВНИРО используется собственный программный комплекс, который выполняет следующие основные функции [2]: 1) визуализацию акустических измерений с различным масштабированием и выделением слоёв; 2) вторичную обработку и анализ эхограмм; 3) ведение интегрированной базы данных акустических и биологических измерений, задействованных в расчётах численности и биомассы рыб. Применительно к садкам разработана реализуемая программным комплексом алгоритмическая схема расчётов, которая представлена на рис. 1.

Основной целью данного исследования являлось изучение возможности использования научного эхолота с расщепленным лучом и программного комплекса SALTSE [2] для счета рыб в садках в режиме реального времени.

Работы выполняли в садке размером 3,0×3,0 м высотой 5,0 м при глубине моря 7 м. За время экспериментов в садок было отсажено от 334 до 3470 особей морского окуня, являющегося объектом промысла и индустриального выращивания во многих странах. Линейные размеры рыб составляли 82–185 мм. В качестве гидроакустической измерительной системы использовался портативный научный эхолот EK60 Simrad с антеннами 120, 200 и 333 кГц с расщепленным лучом и GPT-приемопередатчиками в комплекте с ноутбуком и программным обеспечением ER-60. Перед выполнением измерений была выполнена штатная калибровка эхолота по технологии стандартной сферы.

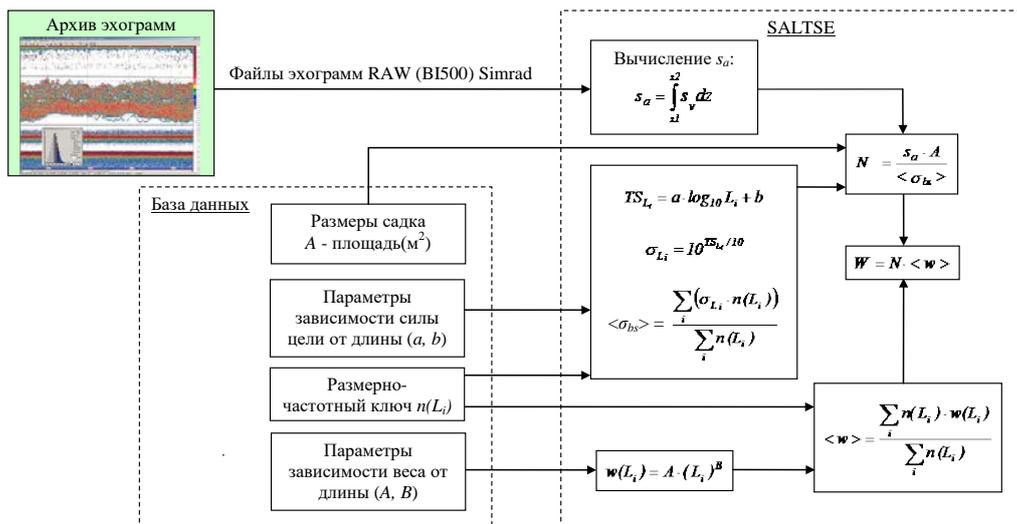


Рис. 1. Алгоритмическая схема расчёта численности рыб в садках.

$i$  — индекс длины объекта;  $S_a$  — коэффициент обратного поверхностного рассеяния на квадратный метр ( $\text{м}^2/\text{м}^2$ ) [3];  $s_v$  — объемный коэффициент обратного рассеяния ( $\text{м}^{-1}$ );  $z_1$  и  $z_2$  — верхняя и нижняя границы слоя интегрирования;  $L_i$  — зоологическая длина объекта (см);  $TS_{L_i}$  — сила цели объекта (дБ);  $a, b$  — коэффициенты для расчёта силы цели  $TS(L_i)$ ;  $n(L_i)$  — количество особей  $i$ -й длины в промере (экз.);  $A, B$  — коэффициенты для расчёта веса объекта  $w(L_i)$ ;  $\langle w \rangle$  — средний вес объекта в садке;  $\sigma_{L_i}$  — поперечное сечение обратного рассеяния ( $\text{м}^2$ );  $\langle \sigma_{bs} \rangle$  — ожидаемое среднее значение поперечного сечения обратного рассеяния единичного объекта ( $\text{м}^2$ );  $N, W$  — численность и биомасса рыб в садке (экз., кг).

**Проведение измерений с варьированием частоты и длительности импульса.** Измерения с рыбой в садке показали, что посылки эхолота с длительностью 0,064 и 0,128 мс дают хорошее разрешение по глубине на всех частотах. Однако, на длительности 0,256 мс и выше увеличивается приповерхностная мёртвая зона и придонная зона тени (рис. 2), что может стать дополнительным источником погрешности измерений при малых глубинах и на низкой частоте. Интенсивность рассеяния (коэффициент обратного объемного рассеяния  $s_v$ ) от рыб сильно зависит от частоты. Максимальная интенсивность обратного рассеяния зондирующего сигнала получена на частоте 200 кГц. Это говорит о том, что рассеяние от морских окуней за счет плавательного пузыря имеет резонансный характер. Поэтому дальнейшие измерения были продолжены с использованием антенны на этой частоте. Для объектов других видов и размеров оптимальную частоту зондирования нужно подбирать индивидуально.

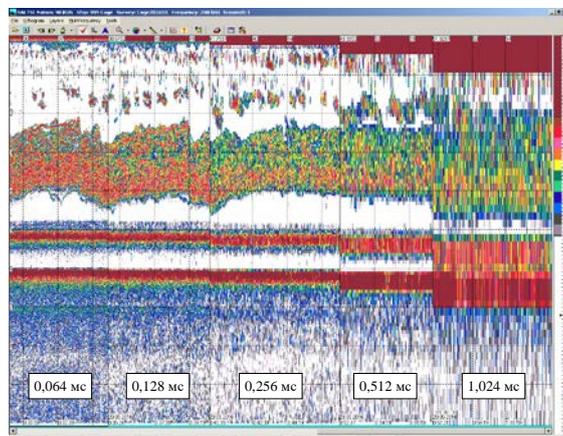


Рис. 2. Фрагменты эхограмм при различной длительности посылки эхолота (частота 200 кГц). Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

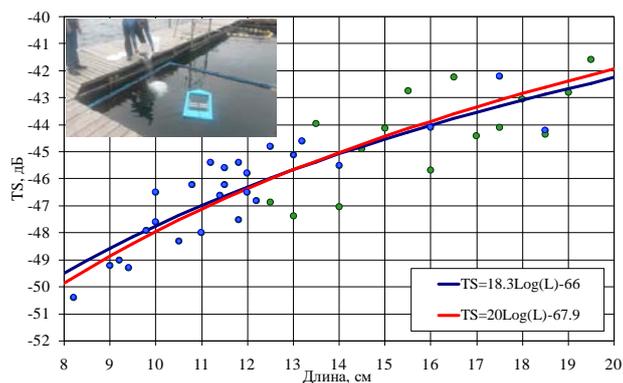


Рис. 3. Зависимости силы цели (TS) окуня от длины (длительность импульса 0,064 мс).  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

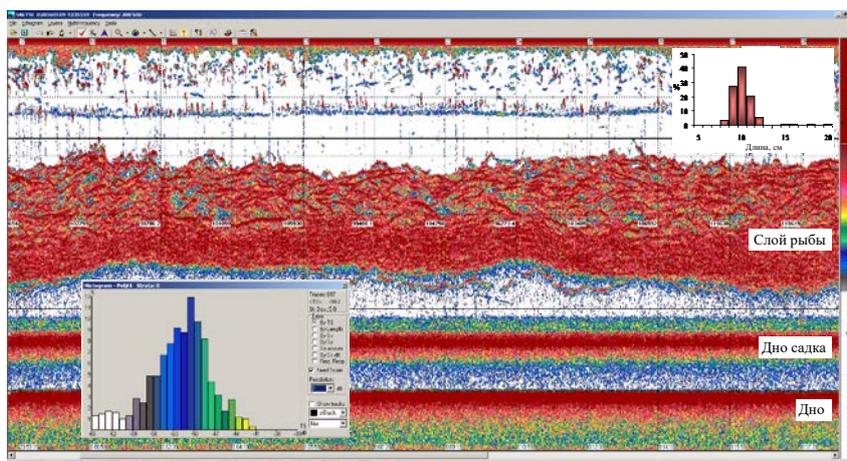


Рис. 4. Фрагмент эхограммы 200 кГц в садке 1793 шт. рыб (0,064 мс).  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**Измерения силы цели рыб.** Точность гидроакустического метода в значительной степени определяет корректное измерение отражающих (звукорассеивающих) свойств рыб и их зависимости от размеров находящихся в садке особей. Зависимости между силой цели (TS) и длиной рыб (L) используются в алгоритме расчёта численности (рис. 1) и задаются уравнениями регрессии. Были измерены силы цели 27 одиночных особей морского окуня размером 8,2–18,5 см при длительности 0,064 мс и 0,128 мс. Уравнение прямой регрессии при длительности 0,064 мс:  $TS=18,3\log(L)-66$  ( $r=0,85$ ;  $p<0,05$ ;  $R^2=0,75$ ); на длительности 0,128 мс:  $TS=23,9\log(L)-72,3$  ( $r=0,87$ ;  $p<0,05$ ;  $R^2=0,80$ ). Нормированная к  $20\log(L)$  регрессия при длительности 0,064 мс:  $TS=20\log(L)-67,9$ ; на 0,128 мс:  $TS=20\log(L)-68,1$ . Результаты измерений и регрессионные кривые на частоте 200 кГц (0,064 мс) представлены на рис. 3.

**Проведение экспериментальных работ с различным количеством рыб в садке.** Рис. 4 иллюстрирует процесс обработки эхограмм в садке с использованием программы SALTSE.

Сопоставлялись данные ручного счета отсаживаемых особей и расчета численности рыб в садке посредством эхоинтеграционного метода. Рассматривались два варианта измерения площади скопления рыб в садке. В первом случае в качестве площади, занимаемой стаей рыб, принята вся площадь садка, т.е. квадрат  $3\times 3$  м. При этом предполагается, что рыбы распределены равномерно внутри занимаемого ею слоя в форме параллелепипеда. Как показано на рис. 5А, расчетная численность рыб в этом случае значительно превосходит результаты ручного счета.

С помощью видео и фотосъемки в процессе экспериментов установлено, что отсаженные особи морского окуня образуют внутри садка стаю, которая по форме представляет собой не параллелепипед, а шар, точнее его вытянутую форму — эллипсоид. Поправка на эллиптичность стаи существенно сближает расчетную численность и данные ручного счета рыб. Их отношение показано на рис. 5Б. При этом, как видно из рис. 5А и 5Б, на точность оценки рыб в садке влияет количество (плотность) отсаженных особей.

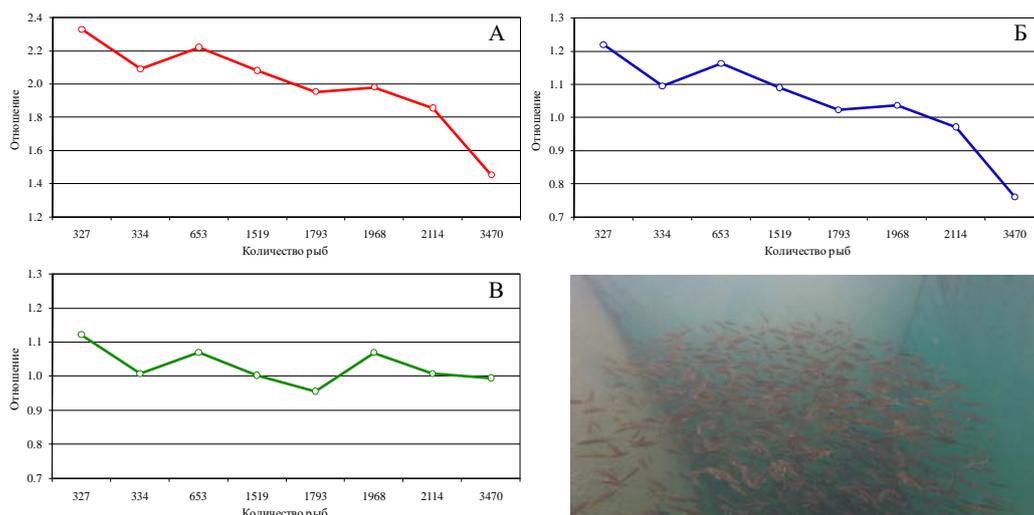


Рис. 5. Отношение расчетной к истинной численности рыб в зависимости от количества особей.

А — стая в форме параллелепипеда; Б — в форме эллипсоида; В — адаптивная форма стаи.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Результаты видеонаблюдений показали, что при небольшой плотности (меньше 200 шт./м<sup>2</sup>), рыбы держаться в косяке в центре садка. Погрешность оценки (отношение расчетной к истинной численности рыб) при рассмотрении стаи в форме параллелепипеда самая высокая. Чем меньше рыб в садке, тем больше погрешность оценки их площади распределения. С ростом числа особей в садке погрешность снижается (рис. 5А). Увеличивается высота занимаемого ею слоя. Рыбы внутри стаи распределяются более равномерно (более плоско) от центра садка к его стенкам, и форма стаи приближается к прямоугольной. Поправка на эллиптичность при больших концентрациях рыб дает отношение меньше 1 (см. рис. 5Б). Поэтому при концентрациях выше указанного порога (в данном случае 200 шт./м<sup>2</sup>), нужно переходить (интерполировать) распределение от эллипсоида к более плоской форме стаи. Например, если ввести соответствующую интерполяцию формы стаи между эллипсом и параллелепипедом при плотности выше пороговой и учесть отстояние рыб от стенок садка, то получаем адаптивные оценки численности и отношения расчетной численности к истинной близкие к 1 (рис. 5В).

**Местоположение антенны эхолота.** Платформу с антенной двигали с фиксированным шагом от центра садка до появления отражения от его краев (боковых стенок). Оценки численности рыб днем варьировали в зависимости от позиции антенны в садке со стандартным отклонением (SD) от 15 до 36 %. Однако усредненные значения численности давали вполне сопоставимые с ожидаемыми результаты (SD < 20 %). Разброс данных, очевидно, связан с неравномерностью распределения рыб на площади садка и их более высокой подвижностью в светлое время суток. При этом в каждой позиции антенны оценки численности варьировали также в зависимости от времени проведения измерений от 5 до 38 %. Однако, при этом, сохранялась тенденция изменения численности (форма кривой) от точки к точке, что говорит о стереотипности распределения (поведения) рыб в разных зонах садка по времени.

**Время проведения измерений.** Наиболее стабильные результаты (SD < 10 %) были получены в темное время суток, когда рыбы малоподвижны и равномерно рассеиваются по площади садка. Такое суточное поведение характерно для многих видов рыб. Если говорить о времени измерений, оптимальным является период, предшествующий окончанию фазы отлива (между 01:00 до 03:00 локального времени). В этот период дно садка относительно ровное (что говорит об отсутствии течения), а оценки плотности наиболее стабильные (что позволяет выполнять измерения с минимальной погрешностью и максимальной простотой).

Оценки численности рыб в течение дня существенно варьировали как на коротких интервалах интегрирования (5–15 мин), так и более длительных временных интервалах (до 60 мин). Причиной этого являются особенности стайного поведения рыб и нестабильное положение стенок садка. Однако прослеживаются определенные цикличности, связанные с

уровнем освещенности и приливно-отливными явлениям в течение суток, которые могут быть использованы для достижения требуемой точности измерений.

С 6:00 до 11:00 (время локальное) оценки плотности рыб в садке очень нестабильные ( $SD > 40\%$ ), что может быть вызвано их высокой подвижностью и изменениями ориентации тела в утренние часы. С 11:00 до 13:00, судя по динамике измеряемого эхолотом расстояния до дна, в районе садка действует отливное течение. При этом центр концентрации рыб смещается из центра садка в сторону течения (по данным видеосъемки рыбы собираются в выдуваемой наружу течением части садка). Оценки численности рыб снижаются. Кроме этого, когда скорость течения максимальна, одна из стенок садка может попасть в луч эхолота. Поэтому оценки численности становятся либо меньше ожидаемых, либо, за счет выдувания стенок садка, сильно варьируют. Проводить измерения в эти периоды нецелесообразно.

Между 13:00 и 14:00 приближается окончание фазы отлива. Соответственно, течение становится слабее, а садок, стабильней. Наблюдается рост численности рыб в центре садка. С 14:00 до 16:00 — фаза максимального отлива. Течение слабое или отсутствует совсем. В этот период стенки садка относительно ровные, а оценки плотности рыб стабильно высокие, что говорит о том, что рыбы находятся в центре или движутся вокруг центра садка, а не у одной из его стенок, когда действуют приливно-отливные течения. Этот период является оптимальным для проведения измерений днем ( $SD < 14\%$ ).

**Эффекты отражения от сетки садка.** Сильные течения и, как следствие, отличное от вертикального положение стенок садка могут стать причиной изменения объема, занимаемого рыбами в садке, и захвата лучом эхолота его стенок. Например, в период 11:00-12:30 садок приобретает вид наклонного параллелепипеда с боковыми стенками в форме трапеции (в сторону течения). В результате – его стенки периодически попадают в луч эхолота и высока погрешность измерений ( $SD > 40\%$ ).

**Заключение.** Из экспериментов следует, что нет необходимости лоцирования как можно большего объема садка, поскольку в условиях периодически меняющихся скорости и направления течений велика вероятность захвата лучом эхолота боковых стенок садка. Наиболее приемлемым является измерение плотности рыб узконаправленным лучом в центре садка и последующая ее интерполяция на форму распределения рыбы от центра к стенкам садка или на форму садка при условии равномерного распределения рыб.

Характерной является зависимость измеряемой эхолотом численности рыб в садке от времени суток и силы течения. Наилучшие результаты были получены в темное время суток и в фазе максимального отлива, т.е. при отсутствии течения. Данную опцию можно автоматизировать, запуская процесс регистрации рыб при достижении минимальной глубины дна по эхолоту.

Источником смещенности оценки численности рыб в садке являются некорректные измерения (непредставительная выборка) размерно-частотного ключа (LFC) и уравнения регрессии  $TS(L)$  — зависимости силы цели от длины рыб. Так, при ошибке измерения размера рыб на 1 см, оценка численности смещается: у рыб длиной 35 см — на 5,6 %, 30 см — на 6,6 %, 25 см — на 7,8 %. При изменении силы цели на 1 дБ оценка численности смещается на 25,9 %.

### *Литература*

1. Daoliang L., Yinfeng H., Yanqing D. Nonintrusive methods for biomass estimation in aquaculture with emphasis on fish: a review // *Reviews in Aquaculture*. 2020. Vol. 12. P. 1390–1411.
2. Кузнецов М. Ю., Убарчук И. А., Поляничко В. И., Сыроваткин Е. В. Программный комплекс для визуализации, многовидовой обработки и хранения данных гидроакустических ресурсных съёмов // *Тр. ВНИРО*. 2021. Т. 183. С. 174–190.
3. MacLennan D. N., Fernandes P. G., Dalen J. A consistent approach to definitions and symbols in fisheries acoustics // *ICES J. of Marine Science*. 2002. Vol. 59. P. 365–369.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА

С. И. Кузнецов

ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская область, Россия

## INVESTIGATION OF THE ACOUSTIC FLOWS INFLUENCE ON THE RESULT OF MEASURING THE TOTAL POWER OF AN ULTRASONIC BEAM

S. I. Kuznetsov

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

*В докладе приведены результаты исследований влияния акустических течений, возникающих при излучении ультразвукового сигнала в водной среде, на результат измерений полной мощности ультразвукового пучка. Приведены результаты измерений мощности ультразвукового преобразователя методом гравитационного уравнивания радиационной силы с использованием средств блокирования акустических течений и без них. Приведены результаты измерений силы акустических течений в ультразвуковом поле известной мощности.*

*The report presents the results of studies of acoustic current influence arising from the emission of an ultrasonic signal in an aquatic environment on the result of measurements of the total power of an ultrasonic beam. The results of measuring the power of an ultrasonic transducer by the method of gravitational balancing of the radiation force with and without means of blocking acoustic currents are presented. The results of measurements of the strength of acoustic currents in an ultrasonic field of known power are presented.*

Применение высокочастотного ультразвука имеет длинную историю. Его применение в материаловедении, расходомерии, дефектоскопии и многих других областях промышленности имеет огромное значение. И в медицине, ультразвуковые методы диагностики и лечения сосудистых заболеваний, онкологии, физической терапии, контроля кровоизлияний значительно развились и обрели высокую востребованность. Для повышения качества работы диагностического и терапевтического ультразвукового оборудования, ультразвуковых приборов, применяемых в промышленности, становится все более важным определение точных уровней их акустического воздействия. Наиболее важной характеристикой, которая должна быть измерена для любого ультразвукового устройства, является акустическая мощность, определяемая как акустическая энергия, излучаемая в единицу времени, где принятой единицей СИ для мощности является ватт (Вт) [1]. Существует множество методов измерения выходной акустической мощности ультразвукового устройства, однако в данной работе проводились исследования с измерителем, основанным на гравитационном методе уравнивания радиационной силы ультразвукового воздействия. Такой метод рекомендован МЭК [2] и реализован в первичном эталоне единицы мощности ультразвука в воде ГЭТ 169-2019. Значение мощности, найденное по результатам измерений радиационной силы, относится к положению мишени на определенном осевом расстоянии от ультразвукового преобразователя. Однако часто обращают внимание на излучаемую мощность, приведенную к поверхности ультразвукового преобразователя. Существуют две базовые модели для расчета разницы между отмеченными выше значениями мощности. Первая из них учитывает только влияние затухания ультразвука. В этом случае делают поправку в виде экспоненциального коэффициента. Вторая включает эффекты акустического течения вдоль пути свободного распространения к фронтальной стороне мишени [2]. Учитывая, что по теореме Боргниса [3] эффекты затухания и акустического течения компенсируют друг друга, а также ввиду малого расстояния от излучателя до поглощающей мишени в измерителе ЭИМУ-3 (входящего в состав ГЭТ 169-2019), ранее не проводились измерения с целью определения конкретного уровня действующих акустических течений. Для определения конкретного вклада действующих акустических течений в измеряемую мощность конкретного излучателя был выполнен ряд экспериментов с применением преобразователя на основе монокристалла из ниобата лития с эффективной площадью активного элемента  $6,8 \text{ см}^2$  и звукопрозрачного экрана. В первом эксперименте проводились сравнительные измерения

мощности ультразвукового преобразователя на различных частотах по схеме, представленной на рис. 1.

Сравнивались показания измерителя мощности ультразвука ЭИМУ-3 при использовании экрана из тонкой (3 мкм) пленки из полиэтилентерефталата вблизи поглощающей мишени и без него. Расстояние между мишенью и преобразователем составляло 2,8 см. Результаты эксперимента представлены на рис. 2. По представленной диаграмме видно, что результат измеренная мощности с применением экрана из пленки несколько ниже, чем без него. При этом видна частотная зависимость, указывающая на то, что с ростом частоты излучаемого сигнала, акустические течения усиливаются. Это связано с тем, что высокочастотные акустические сигналы хорошо поглощаются средой распространения, вызывая ее движение. Отношение измеренной мощности поршневого излучателя при отсутствии экрана акустических течений к измеренной мощности с применением такого экрана показано на рис. 3. В следующем эксперименте проводились такие же сравнительные измерения мощности, как и в первом варианте, но расстояние от излучателя до мишени было уменьшено до 1,2 см. Результаты измерений мощности в присутствии экрана и без него, закономерно, оказались значительно ближе друг другу. Измерения на каждой частоте проводились не менее 10 раз, а СКО результатов измерений не превысило 0,5 %.

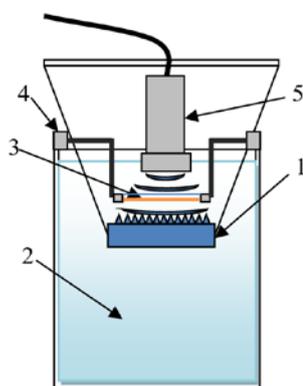


Рис. 1. Измерение мощности ультразвукового пучка с применением экрана из звукопрозрачной пленки.

- 1 — поглощающая мишень измерителя;
- 2 — бак с водой;
- 3 — звукопрозрачная пленка;
- 4 — держатель экрана акустических течений; 5 — ультразвуковой преобразователь.

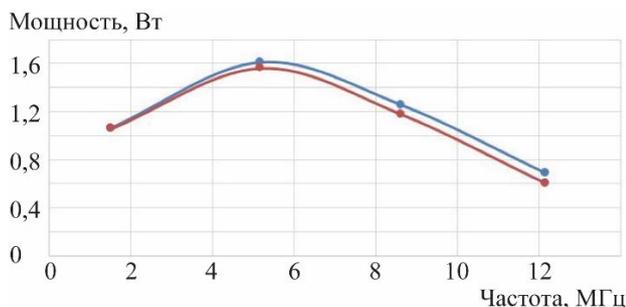


Рис. 2. Результаты сравнения измеренной мощности ультразвукового преобразователя с применением защиты от акустических течений и без нее.

Синий цвет — без экрана; красный — с экраном.

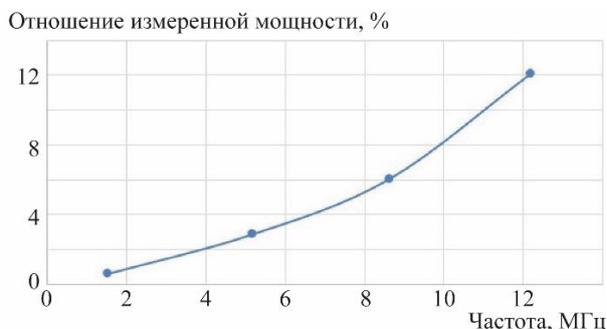


Рис. 3. Отношение измеренных мощностей при использовании экрана акустических течений и без него.

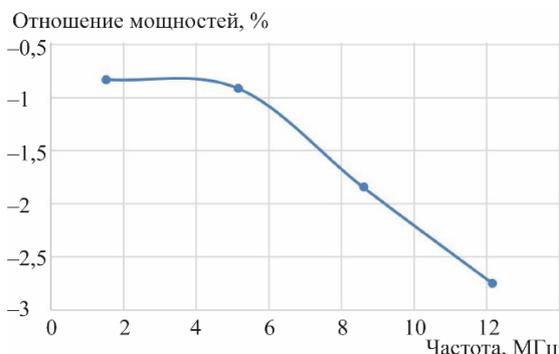


Рис. 4. Результаты сравнения измеренной мощности в присутствии экрана и без него.

В результаты измерений мощности с применением экрана акустических течений были внесены поправки, учитывающие затухание акустической волны в среде и в используемой пленке. Исследования поглощающих и отражающих свойств тонких ПЭТ пленок приведены в [4]. Результаты сравнения измеренной мощности в присутствии экрана и без него представлены на рис. 4.

Как видно, внесенные поправки сильно изменили результаты измерений. По графику ясно, что при учёте поглощения ультразвука в воде и пленке, рассчитанная мощность несколько ниже измеренной в отсутствие экрана. Это может быть связано с тем, что часть акустической энергии, поглощаясь жидкостью, не только придавала ей вектор течения, но и, вероятно, нагревала ее. Так как экран имеет специфическую форму, уменьшающую скорость теплообмена между водой в облучаемом пространстве и окружающей жидкостью, влияние нагрева среды усиливается. Согласно [2] рабочая формула, по которой проводится расчёт измеренной мощности выглядит так:

$$P = c \cdot F, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость звука в жидкости;  $F$  — воздействующая на мишень сила.

С ростом температуры воды скорость звука в ней также увеличивается. Влияние этого эффекта было оценено с помощью микротермопары, помещенной в облучаемое пространство. Локальное изменение температуры воды в облучаемом пространстве при измерении мощности (обычно цикл облучения мишени не превышает 20 с) не превысило  $5^{\circ}\text{C}$ . Для определения скорости звука использовалась формула Вильсона для нулевой глубины. По расчётам вклад локального нагрева облучаемой среды в завышение измеренной мощности не может превышать 0,5 %. Однако, этот источник неопределенности не может быть единственной причиной такого существенного отличия измеренной мощности в присутствии экрана и без него.

Некоторое падение мощности при использовании экрана может быть связано и с эффектами кавитации. В экспериментах была использована дегазированная вода с содержанием растворенного кислорода менее 4 мг/л. Но даже такая дегазированная вода не обеспечивает полного отсутствия выделения пузырьков воздуха в облучаемом пространстве. Нижняя часть экрана из ПЭТ пленки при измерениях становится местом скопления выделенных из воды микропузырьков, что меняет его ультразвуковую проницаемость.

Проведенные измерения показали, что не вся поглощенная акустическая энергия, излучаемая преобразователем в процессе измерений, преобразуется в акустические течения. Был выявлен нагрев облучаемой среды, что само по себе является признаком преобразования ультразвуковой энергии в тепловую, а не в кинетическую. В экспериментах излучатель располагается вертикально, а излучаемый ультразвук направлен сверху вниз. Это приводит к тому, что нагретая среда вместо задаваемого акустическим течением движения вниз — к мишени — частично движется в противоположную сторону из-за конвекции, влияя на результат измерений. Влияние акустических течений на результат измерения полной мощности ультразвукового пучка тем больше, чем выше частота излучаемого сигнала, и пренебрегать этим влиянием нельзя.

#### *Литература*

1. ГОСТ Р 50267.5-92(МЭК 60601-2-5). Изделия медицинские электрические // Частные требования к аппаратам для ультразвуковой терапии. Ч.2
2. ГОСТ Р МЭК 61161-2019 Мощность ультразвука в жидкостях // Общие требования к выполнению измерений методом уравнивания радиационной силы.
3. Borgnis F. E. On the forces due to acoustic wave motion in a viscous medium and their use in the measurement of acoustic intensity // J. Acoust. Soc. 1953. Am. 25. P. 546–548.
4. Еняков А. М., Кузнецов С. И., Лукин Г. С. Применение звукопроводящей полимерной плёнки для калибровки гидрофонов методами оптической интерферометрии // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 61–66.

# ИНЖЕНЕРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГИДРОФИЗИКИ И ГИДРОАКУСТИКИ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОННО-СОПРОВОДИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ДАННЫХ

*А. Б. Химаныч*

АО «СПО «Арктика», Северодвинск, Россия

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

## DETERMINATION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS USING CAPABILITIES OF THE INFORMATION AND ACCOMPANYING DATA NETWORK

*A. B. Khimanych*

JSC «SPO «Arktika», Severodvinsk, Russia

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

*В докладе рассматриваются вопросы определения остаточного ресурса корабельных радиоэлектронных систем на основе принципов индуктивной самоорганизации с использованием информационно-сопроводительной сети данных.*

*The report examines the issues of determining the residual resource of shipboard radio-electronic systems based on the principles of inductive self-organization using an information-assisted data network.*

В условиях эксплуатации корабельные радиоэлектронные системы (РЭС) подвергаются значительным дестабилизирующим внешним воздействиям, которые порождают повреждения, накапливающиеся со временем и снижающие вероятность их работоспособного состояния [1]. Достигнув критического уровня, накопленные в результате эксплуатации повреждения приводят к отказам оборудования. Опыт эксплуатации сложных РЭС показывает, что возникновению отказов (аварийных ситуаций) и предотказных состояний, как правило, предшествуют скрытые аномальные явления. В этой связи разработка методов и средств заблаговременного обнаружения предпосылок к возникновению предотказных состояний (потенциально возможных отказов) и идентификации источников их возникновения является актуальной задачей, способствующей повышению эффективности функционирования технической системы, поддержанию требуемого уровня технических характеристик и показателей надежности, сокращению временных циклов технического обслуживания и ремонта, а также сокращению материальных и финансовых издержек в период эксплуатации. При появлении признаков критического предотказного состояния необходимо корректировать стратегию технической эксплуатации, а также проводить соответствующие мероприятия по техническому обслуживанию с целью своевременного предотвращения отказов, либо проводить ремонт оборудования с целью исключения его перехода в предельное состояние. Практическая польза от модели технической эксплуатации РЭС со следящей системой диагностики в том, что она способна прогнозировать возникновение отказа задолго до его возникновения и применять превентивные меры по устранению его причин.

Следящая система диагностики РЭС может быть реализована путем организации и использования информационно-сопроводительной сети данных о ходе эксплуатации корабельного оборудования (ИСС). Одной из главных задач ИСС является формирование

интегрированной базы данных по текущему эксплуатационному состоянию РЭС, мониторинг протекания этапов их жизненного цикла и статистический анализ эксплуатационных параметров аппаратуры [2]. Собранная информация во время эксплуатации РЭС может быть использована для определения с заданной вероятностью интервала времени, в течении которого сохраняется работоспособное исправное состояние объекта, либо определения вероятности сохранения работоспособного исправного состояния объекта на заданный интервал времени. Особое значение для прогнозирования технического состояния и оценки остаточных ресурсных показателей имеют следующие составные части ИСС: база данных по отказам и неисправностям, база данных по ретроспективным каталогам данных хода эксплуатации изделий. Принципы формирования и использования ИСС, предложенные в [2] для корабельного гидроакустического оборудования, могут быть успешно использованы для широкой номенклатуры корабельных РЭС различного назначения.

Информация о техническом состоянии РЭС для включения в базу данных ИСС может быть получена путем текущих наблюдений за основными техническими параметрами (диагностическими признаками). В качестве диагностических признаков предпочтительнее выбирать технические характеристики изделий, приведенные в технических условиях на поставку (ТУ), контролируемые во время приемо-сдаточных испытаний и в период эксплуатации при выполнении технического обслуживания в соответствии с требованиями эксплуатационной документации. На основе данных технической диагностики могут быть выполнены прогнозные оценки технического состояния.

В АО «СПО «Арктика» накоплен большой опыт решения подобных практических задач, т.к. предприятие более полувека выполняет ввод в эксплуатацию, сервисное техническое обслуживание и ремонт широкой номенклатуры судового радиоэлектронного оборудования. В результате активного участия в эксплуатации РЭС на всех стадиях жизненного цикла накоплена обширная статистическая база данных по надежности и изменению технического состояния аппаратуры, необходимая для формирования ИСС.

Важную роль в практическом использовании ИСС для задач определения остаточного ресурса и уровня надежности РЭС приобретают методы анализа данных. Следует учитывать, что процессы, происходящие с РЭС во время эксплуатации, носят случайный характер из-за флуктуации выходных параметров, имеющей место в отдельных элементах, блоках, приборах по причине изменения большого числа внутренних параметров элементов в следствии их старения, внезапных отказов и т.п. В связи с этим диагностические параметры фиксируются обычно в условиях различных случайных помех, затрудняющих определение основной тенденции изменения параметра, свидетельствующей о неисправности. Неизбежно присутствующая ошибка может повлиять на объективность прогнозирования технического состояния РЭС.

Для приведения ошибки к минимуму необходимо использовать методы анализа данных, характеризующих техническое состояние объекта диагностики, обладающие повышенной помехоустойчивостью. С информационной точки зрения техническое диагностирование представляет собой процесс получения последовательности измеренных через определенные промежутки времени диагностических параметров. При их изучении важно определить характер, содержание, количественные характеристики степени нерегулярности изучаемых процессов за счет использования новых видов обработки информации для определения математической модели.

Математическая модель должна обладать наилучшими прогнозными свойствами, максимально точно описывая динамику технических параметров РЭС во времени, работая при этом с относительно короткими выборками «зашумленных» данных, содержащихся в базах ИСС. При этом она должна быть достаточно простой. Для использования при прогнозировании величины остаточного ресурса и параметров надежности РЭС из всего многообразия известных методов статистической обработки информации наиболее подходят методы на основе принципа индуктивной самоорганизации, в частности метод группового учета аргументов [3, 4].

Сущность метода группового учета аргументов заключается в целенаправленном переборе моделей претендентов по выбранному критерию. В качестве основных критериев используются критерии регулярности, т.е. критерий минимума относительной квадратической погрешности (максимума коэффициента корреляции) на отдельной проверочной последовательности

исходных данных [5]. Целью при этом является не минимум ошибки на уже известных точках интерполяции, а минимум ошибки на новых точках, которых в момент синтеза уравнения регрессии пока еще нет. Особенность метода группового учета аргументов заключается в утверждении, что для задачи однократного прогноза целесообразно несколько снизить точность определения оценки коэффициентов уравнения регрессии, но за счет этого придать ему большую регулярность (прогнозирующую силу).

Прогнозирующая модель имеет вид полинома:

$$y(t) = a_0 + \sum_{i=0}^n a_i t^i, \quad (1)$$

где  $a_0$  — свободный член полинома;  $a_i$  — неизвестный коэффициент;  $n$  — установленное значение максимальной степени полинома.

Для формирования модели оптимальной сложности, характеризующей действительный процесс, предлагается ограничиться полиномами 5–6-ой степени. Более высокая степень полинома совсем не гарантирует высокой точности модели. Задача состоит в нахождении значений коэффициентов полинома.

Метод обладает вычислительной простотой. Алгоритм вычислений состоит из нескольких этапов. Первоначально производится ранжирование значений диагностического параметра, хранящегося в ИСС, по дисперсии выходной величины. Значения разделяются на 2 последовательности: обучающую и проверочную. С использованием данных обучающей последовательности и регрессионного анализа производится расчет коэффициентов полиномов моделей-претендентов. Из всех рассчитанных моделей выделяются 3–4 полиномиальные зависимости, имеющие минимальное рассогласование между расчетными и действительными значениями. Для определения единственной модели с наилучшими прогнозными свойствами производится расчет с использованием данных из проверочной последовательности и критерия минимума смещения [6]. Высокой степенью адекватности обладают модели, имеющие относительную квадратическую погрешность менее 1 %.

Далее с помощью выбранной математической модели производится процедура экстраполяции тренда по формуле:

$$y(t + T_{\text{пр}}) = f(y(t), T_{\text{пр}}), \quad (2)$$

где  $y(t + T_{\text{пр}})$  — экстраполируемое значение функции;  $T_{\text{пр}}$  — период прогноза.

Условием работоспособности РЭС по данному параметру является неравенство:

$$y_{iH} \leq y_i(t) \leq y_{iB}, \quad (3)$$

где  $y_{iB}^B$  и  $y_{iH}^H$  — верхняя и нижняя границы допуска  $r$ -го параметра, определяющего предельное состояние объекта.

Полученная математическая модель позволяет определить вероятность недостижения предельного состояния в течении прогнозируемого периода по формуле [5]:

$$P_r(\tau + t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S_r^2(\tau+t)}} \int_{y_r^H}^{y_r^B} \exp\left\{-\frac{[y_r - \bar{y}_r(\tau+t)]^2}{2S_r^2(\tau+t)}\right\} d y_r, \quad (4)$$

где  $\tau$  — момент времени проведения последнего измерения параметра, определяющего предельное состояние;  $\bar{y}_r(t)$  — наиболее адекватная модель  $r$ -го определяющего параметра;  $S_r^2(\tau + t)$  — дисперсия  $r$ -го определяющего параметра, математическая модель которого строится методом группового учета аргументов.

При наличии у РЭС нескольких диагностических параметров по приведенному алгоритму производится построение математической модели для каждого параметра и последующий прогноз динамики его изменения во времени.

**Выводы.** 1) Оценка остаточного ресурса корабельных РЭС на принципах индуктивной организации, в частности методом группового учета аргументов, позволяет эффективно использовать накопленные в составе ИСС за время эксплуатации объективные данные о техническом состоянии оборудования и выявленных отказах. 2) Применение принципа индуктивной самоорганизации моделей предполагает применение современных компьютерных технологий для решения задачи моделирования, прогнозирования, управления и принятия решений в период эксплуатации и ремонта по техническому состоянию корабельных РЭС.

**Литература**

1. Старжинская Н. В., Чернова А. И. Эксплуатационная надёжность берегового радиооборудования с учётом применения ЗИП для восстановления работоспособности // Транспортное дело России. Морские вести России. М. 2019. № 3. С. 129–132.
2. Шаховин А. В. Современный подход к участию предприятий морского приборостроения в поддержании технической готовности гидроакустического вооружения ВМФ // Морская радиоэлектроника. СПб. 2020. № 2(72). С. 2–9.
3. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Научная мысль, 1982. 296 с.
4. Ивахненко А. Г., Юрачковский Ю. П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.
5. Белов В. П., Голяков А. Д. Метод оценивания ресурса технических объектов по результатам текущих наблюдений на основе принципа самоорганизации // Сб. тез. докл. Междун. конф.: «Проблемы надёжности машин и конструкций» (Надёжность-2002). Минск. 2003. С. 78–85.
6. Допира Р. В., Брежнев Д. Ю., Овруцкий Д. А. Подход к реализации алгоритма технического состояния сложной технической системы // J. Theory and Applications. Электрон. 2017. № 2. Режим доступа: [www.swsys-web.ru](http://www.swsys-web.ru), свободный (дата обращения 14.10.2021).

## АВТОНОМНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БИОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Н. А. Данилов, канд. техн. наук, М. П. Иванов<sup>1</sup>, канд. биол. наук

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

## AUTONOMOUS BROADBAND MULTICHANNEL DIGITALLY CONTROLLED AMPLIFIER FOR RECORDING BIOACOUSTIC SIGNALS

N. A. Danilov, Ph.D., M. P. Ivanov<sup>1</sup>, Ph.D.

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*В связи с развитием технологий беспилотных подводных аппаратов широкое распространение получили способы широкополосного наблюдения акустических сигналов в водной среде. Целью данного исследования является разработка новых гидроакустических методов наблюдения эхолокации и коммуникации с помощью разработанного автономного широкополосного многоканального усилителя с цифровым управлением. Управление устройством реализовано на базе встраиваемого мини-ПК по USB каналу и с помощью удаленного компьютера.*

*In connection with the development of technologies for unmanned underwater vehicles, methods of broadband observation of acoustic signals in the aquatic environment have become widespread. The purpose of this study is to develop new hydroacoustic methods for observing echolocation and communication using the developed autonomous broadband digitally controlled multichannel amplifier. Device is controlled by special soft running on the miniature embedded fanless-PC via USB using another remote notebook.*

Широкополосные системы пассивного акустического мониторинга необходимы для исследования биоакустической активности животных в различных районах мирового океана с возможностью идентификации по видовому и внутривидовому разнообразию [1, 2]. В настоящее время исследование коммуникационных способностей морских млекопитающих требует разработки специального оборудования: гидрофонов, многоканальных усилителей и систем длительной регистрации биоакустических сигналов. Предварительные исследования показывают, что эхолокационные и коммуникационные сигналы морских животных [1] могут располагаться в полосе частот от десятков Гц и до 200 кГц, а возможно и более. В [3] рассматривается лабораторный экземпляр трехканальной системы регистрации с верхней границей полосы пропускания более 200 кГц. Опыт эксплуатации такой системы показал, что информация о коммуникативных сигналах морских животных может быть искаженной вследствие ограниченной полосы пропускания сверху и довольно высокого уровня шума в области низких частот. Основные цели разработки усилителя: обеспечить усиление сигнала в диапазоне от 0 до 60 дБ при минимальном уровне выходных шумов в широкой полосе частот. Работа всей системы регистрации биоакустических сигналов должна производиться автономно.

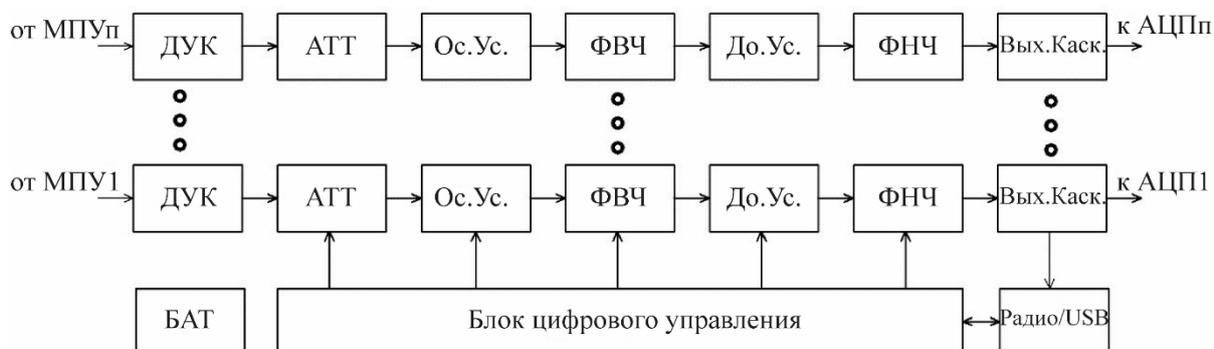
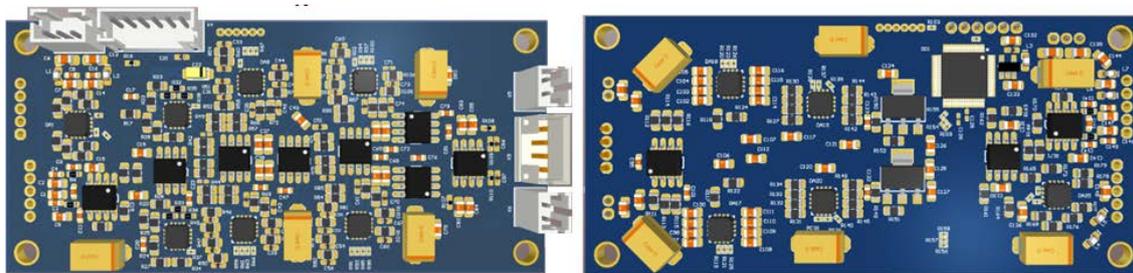


Рис. 1. Структурная схема усилителя.

Автономность обеспечивается за счет применения в схеме питания системы аккумуляторных батарей и установки параметров усиления (коэффициент усиления и полоса пропускания) удаленно по радиоканалу. Качество биоакустических сигналов (отсутствие подводных шумов, искажений) может оцениваться на слух с использованием стандартной беспроводной колонки или наушников Bluetooth. Структурная схема усилителя представлена на рис. 1. Входной каскад выполнен с применением метода дифференциального усиления сигнала с использованием двух операционных усилителей (ОУ). В каскад добавлена схема вычитания постоянной составляющей входного сигнала. Далее следует каскад ослабления сигнала (АТТ), он может быть полезен в случае, если амплитуда входного сигнала слишком велика. Величина ослабления устанавливается дискретно и может принимать одно из 8 значений. Следующим каскадом является основной каскад усиления сигнала (Ос.Ус.). Этот каскад выполнен на ОУ с высокой скоростью нарастания выходного сигнала ( $80 \div 100$  В/мкс), имеет дискретный ряд установки коэффициента усиления из 4 значений. После основного усилителя сигнал поступает на фильтр высоких частот (ФВЧ) второго порядка. ФВЧ имеет 4 дискретных входа для установки нижнего значения полосы пропускания устройства. Далее сигнал поступает на дополнительный каскад усиления, реализованный на ОУ с дискретным переключением коэффициента усиления, который может принимать одно из 8 значений. Максимальное суммарное усиление двух каскадов достигает величины 60 дБ. После усиления сигнал проходит через фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка. ФНЧ имеет 4 дискретных входа для установки одной из четырех возможных величин верхней границы полосы пропускания устройства.

Для согласования по напряжению со входом модуля аналого-цифрового преобразователя (АЦП) предусмотрен выходной каскад (Вых. Каск.). В нашей работе мы использовали модуль АЦП E20-10 компании L-CARD и придерживались рекомендаций по согласованию входа приведенных в [4]. Кроме этого, сигнал с выхода через повторитель напряжения подается на звуковой вход специализированного радиомодуля стандарта Bluetooth. Стек A2DP протокола Bluetooth позволяет передавать высококачественный стереозвук на расстояние до 30 м. Блок цифрового управления (БЦУ) принимает команды через шину USB или по беспроводному интерфейсу с использованием стека RFCOMM протокола Bluetooth. В соответствии с принятой командой выполняется установка параметров работы блока в структурной схеме на рис. 1.

Элементарным модулем для построения многоканального широкополосного усилителя является двухканальный усилитель. Этому способствует наличие двух беспроводных каналов для передачи стереозвука, наличие широко распространенных сдвоенных интегральных микросхем (ИМС) ОУ, приемлемые размеры печатной платы ( $80 \times 40$  мм) и соответственно печатного узла элементарного модуля. Элементарный двухканальный усилительный модуль реализован на отдельной печатной плате. Модуль может быть отдельным двухканальным усилителем, или входить наравне с другими такими же модулями в многоканальный усилитель. Многоканальный широкополосный усилитель реализуется посредством набора и соединения заданного количества двухканальных модулей в одном корпусе. Такое решение позволяет упростить технологию сборки и отладки конечных устройств. Печатная плата элементарного модуля выполнена с использованием техники проектирования малошумящих усилительных цепей. Трехмерная модель элементарного модуля печатного узла усилителя представлена на рис. 2.



а б  
Рис. 2. Модель печатного узла элементарного модуля.

а — верхний слой с установленными компонентами; б — нижний слой с установленными компонентами.

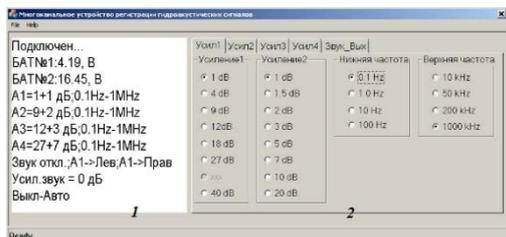


Рис. 3. Окно управление параметрами усилителя.

1 — окно для вывода текущих параметров работы усилителя; 2 — страница параметров для установки коэффициента усиления и полосы пропускания.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

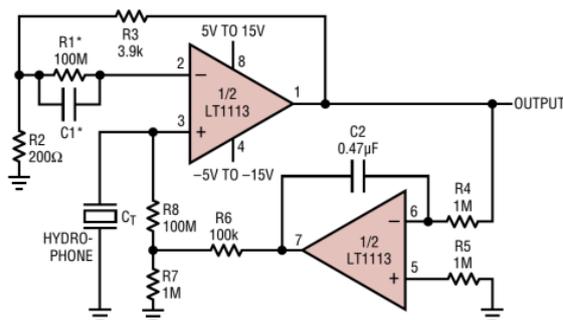


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема предусилителя.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Для управления параметрами усилителя разработано специальное программное обеспечение (СПО) для работы в удаленном режиме с ОС Windows. Включение/выключение усилителя, контроль источников питания, контроль и управление коэффициентом усиления каждого канала, управление частотными характеристиками каждого канала в отдельности, контроль прослушивания среды работает с удаленным динамиком по каналу Bluetooth. Одновременно можно прослушивать один или два любых канала (рис. 3).

Информация всех установленных параметров усилителя считывается и обновляется каждые 500 мс. Параметры усилителя: входное сопротивление: 50 кОм, входная емкость: не более 2 пФ, нижняя частота полосы пропускания: не более 1 Гц, верхняя частота полосы пропускания: не менее 750 кГц, максимальное усиление: не менее 60 дБ.

Для согласования входного сопротивления пьезокерамического датчика и входного сопротивления усилителя используется предусилитель. Принципиальная схема предусилителя представлена на рис. 4. Данная схема, рекомендованная производителем ИМС LT1113 для проектирования малозумящих устройств. Входное сопротивление предусилителя — не менее 100 МОм; входная емкость — не менее 100 пФ (подбирается под конкретный первичный преобразователь); коэффициент усиления равен 26 дБ; напряжение питания составляет  $\pm 7$  В, что позволяет полностью использовать динамический диапазон АЦП E20-10 —  $\pm 3$  В.

Выходной каскад предусилителя реализован по схеме с дифференциальным выходом, по аналогии с выходом малозумящего гидрофона TC4032 компании Teledyne Reson [5]. Значения емкостей в выходном каскаде предусилителя совместно с входным сопротивлением усилителя позволяют получить нижнюю границу полосы пропускания на уровне 0,5 Гц.

Как показали контрольные измерения регистрирующего тракта, полоса частот шириной 200 кГц недостаточно полно отображает сигналы гидробионтов. Контрольные измерения в условиях открытой воды, проведенные на дельфине белухе, показали это достаточно убедительно (рис. 5). Спектр сигналов при ширине тракта записи 200 кГц теряет высокочастотные составляющие, что приводит к трудностям в трактовке результатов экспериментов. В качестве примера приведем осциллограмму последовательности импульсов дельфина (рис. 5), записанную с помощью полевого варианта комплекса регистрации.

Средняя величина интервала между импульсами составляет  $20 \pm 2$  мс (рис. 5, а). График изменения интервала между экстремумами в зависимости от номера импульса по порядку представлен на рис. 5, б. Максимальный интервал составляет 2,9 мкс, а минимальный интервал 2,3 мкс (рис. 5, б), что соответствует максимуму спектральной плотности мощности на частоте 172 кГц и ширине основного лепестка 234 кГц, а также 217 кГц и ширине 434 кГц соответственно.

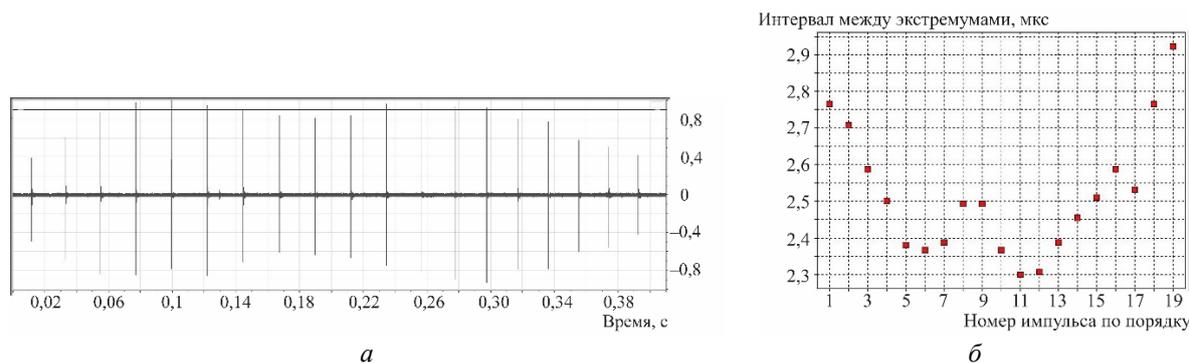


Рис. 5. Последовательность 19-ти импульсов белухи.

*a* — осциллограмма длительностью 400 мс; *б* — интервал между экстремумами в мкс.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

В тоже время, большинство сигналов при регистрации всеми исследователями в полосе до 200 кГц интервал между экстремумами составляет 5 мкс, что соответствует максимуму спектральной плотности мощности на частоте 100 кГц и ширине основного лепестка 200 кГц, т.е. ширина основного лепестка спектральной плотности мощности соответствует ширине полосы частот тракта регистрации. Таким образом, несоответствие между шириной полосы излучаемых сигналов гидробионтов и шириной полосы тракта регистрации приводит к искажению регистрируемых сигналов, а соответственно и трактовке результатов измерений.

При регистрации протокола измерений запись голоса оператора проводится либо на один из каналов АЦП, либо на мини — ПК через микрофонный/линейный вход с передачей данных по каналу Bluetooth. Частота квантования АЦП зависит от количества включенных каналов. Так, например, при частоте 10 МГц обслуживается 1 канал, а при включении 4-х каналов, частота квантования снижается до 2,5 МГц на канал. Сбор информации происходит на цифровой носитель, а управление усилителем происходит удаленно с помощью установленного программного обеспечения на встроенном мини — ПК типа fit-PC. Таким образом, комплекс (гидрофоны, усилитель, АЦП и мини-ПК) является практически автономным устройством и обладает отсутствием внешних переключателей и разъемов, кроме разъемов на предусилители, источник питания и управления параметрами - USB. Широкая полоса частот сквозного тракта делает этот комплекс идеально подходящим для регистрации реальных сигналов, а многоканальность позволяет идентифицировать объект эхолокации или коммуникации. Длительность регистрации зависит от емкости аккумуляторов, частоты квантования, емкости винчестера, количества задействованных каналов, количества включенных приборов АЦП. Каждый канал усилителя и АЦП имеет независимую регулировку параметров. При использовании функции внешней синхронизации приборов E20-10 (АЦП) количество каналов регистрации увеличивается, а их расположение, разнесенное по пространству наблюдения с широкополосными усилительными каналами, становится более выгодным и реализуемым для регистрации сигналов гидробионтов в естественной среде обитания.

### Литература

1. Au W.W.L., Lammers M. O. Listening in the Ocean / Springer, New York, 2016. 41 бр.
2. Munger L. M., Lammers M.O., Cifuentes M., Würsig, B., Jefferson, T., Hung, S. Indo-Pacific humpback dolphin occurrence north of Lantau Island, Hong Kong based on year-round passive acoustic monitoring // J. Acoust. Soc. Am. 2016. Vol. 140. P. 2754–2765.
3. Иванов М. П., Бутов С. Н., Леонова Л. Е., Романовская Е. В., Стефанов В. Е. Апробация лабораторного макета регистрации сигналов дельфинов с расширенной полосой частот сквозного тракта // Акуст. жур. 2019, Т. 65, № 5, с. 699-707. DOI: 10.1134/S0320791919050101.
4. E20-10 быстродействующий внешний модуль ввода-вывода на шину USB 2.0. // <https://www.lcard.ru/products/external/e20-10/>
5. RESON Hydrophones // <http://www.teledynmarine.com/reson-tc-4032?ProductLineID=48>
6. Иванов М. П., Родионов А. А., Стефанов В. Е. Возможности сверхширокополосных систем наблюдения на примере исследования природного сонара зубатых китов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13(4). С. 100–120. <https://doi.org/10.7868/S2073667320040097>.

О КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРИЕМНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТОРОНЕ

Т. К. Богданов, Е. А. Ульянов

АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

ON THE CORRECTION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS  
OF RECEIVING-RADIATING TRANSDUCERS OF HYDROACOUSTIC  
ANTENNAS ON THE ELECTRICAL SIDE

T. K. Bogdanov, E. A. Ulyanov

JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

*Представлены варианты корректировки частотных характеристик приемно-излучающих преобразователей гидролокаторов в различных частотных диапазонах с использованием эквивалентных схем преобразователей и добавочных RLC-цепей. Приведено сравнение результатов моделирования и измерений реальных макетов антенн с цепями коррекции.*

*Options for correcting the frequency characteristics of receiving-radiating sonar transducers in different frequency ranges using equivalent circuits of transducers and additional RLC-circuits are presented. The results of modeling and measurements of real antenna prototypes with correction circuits are compared.*

При проектировании приемно-излучающих трактов гидроакустических антенн иногда возникает необходимость корректировки их частотных характеристик в части обеспечения требуемой полосы пропускания. Такую корректировку возможно провести схемотехнически с помощью применения пассивных RLC-цепей, что является довольно простым и удобным решением, позволяющим избежать необходимости изменения конструкции самих пьезоэлектрических преобразователей. Ниже показаны возможности расширения полосы пропускания антенного устройства с цепями коррекции амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) в режимах излучения и приема. Моделирование электрических схем произведено с использованием программы Electronics Workbench [1].

**Расширение полосы пропускания тракта излучения.** Общий принцип расширения полосы пропускания в режиме излучения отражен в схеме, представленной на рис. 1. Рис. 1 содержит эквивалентную схему замещения однорезонансной антенны ( $C_2, C_1, L_1, R_1$ ), добавочные RLC-элементы, позволяющие расширить полосу пропускания тракта излучения, и вид результирующей АЧХ напряжения, снятой с резистора  $R_1$  и являющейся эквивалентной АЧХ давления в режиме излучения.

Для решения задачи расширения полосы в излучении требуется компенсация статической емкости антенны с помощью дросселя  $L_2$  на частоте резонанса антенны  $F_0$ , образованной контуром  $C_1/L_1$  эквивалента. Кроме этого, последовательно с антенной необходимо включить последовательный резонансный контур  $L_3/C_3$ , настроенный на частоту  $F_0$ , параметры которого подбираются индивидуально при моделировании. В этом случае на частоте  $F_0$  параллельный контур  $L_2/C_2$  будет иметь очень большое сопротивление, а последовательный контур  $L_3/C_3$  — сопротивление, близкое к нулю. В области частот ниже  $F_0$  параллельный контур будет иметь индуктивный характер, а последовательный контур — емкостной характер, и на некоторой частоте  $F_1$ , ниже частоты  $F_0$ , эти контура обеспечат резонанс напряжений, увеличивая напряжение на входе антенны. В области частот выше  $F_0$  параллельный контур будет иметь емкостной, а последовательный контур — индуктивный характер, и опять найдется такая частота  $F_2 > F_0$ , на которой возникнет резонанс напряжений, увеличивающий напряжение на входе антенны. Все эти процессы приведут к формированию трехгорбой АЧХ с близким к единице максимумом в области  $F_0$  и подъемами на частотах  $F_1$  и  $F_2$ , расширяя при этом полосу пропускания тракта излучения до по крайней мере октавы.

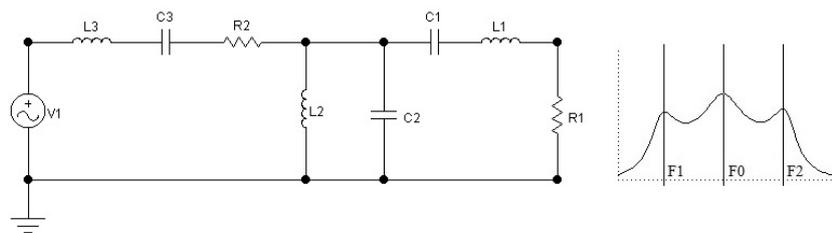


Рис. 1. Схема расширения полосы пропускания тракта излучения с однорезонансной антенной и вид АЧХ.

Такой подход является обобщенной основой не только для стандартных однорезонансных систем, но и, например, для более широкополосных антенн, содержащих преобразователи с двумя близкими резонансами, представленные вместе с их эквивалентной схемой замещения на прошлой конференции [2]. Дополнительная коррекция в виде последовательного добавочного дросселя L3 (рис. 2) позволяет аналогично сформировать 3 резонансных контура, что позволяет еще больше расширить полосу пропускания за счет создания дополнительного последовательного резонанса на входе антенного устройства.

Измеренные нормированные АЧХ в рабочей полосе частот реального макета широкополосной антенны в режиме излучения без коррекции и с добавочным дросселем представлены на рис. 3.

Полоса пропускания данной антенны без коррекции АЧХ по уровню 0,707 составляет величину порядка октавы, а в случае использования коррекции — на 20 % больше при снижении неравномерности в рабочем диапазоне. Похожая коррекция вполне успешно может применяться и для излучающих однорезонансных каналов (рис. 4). Здесь за счет введения дополнительного резонансного L1/C1 контура и ограничивающего резистора R1 обеспечивается подъем АЧХ на краях рабочего диапазона. Измеренные нормированные АЧХ реального макета излучающей антенны с использованием такой схемы коррекции и без неё представлен на рис. 5. Следствием такой коррекции является выравнивание частотной характеристики и значительное расширение полосы пропускания (в несколько раз по сравнению с антенной без коррекции).

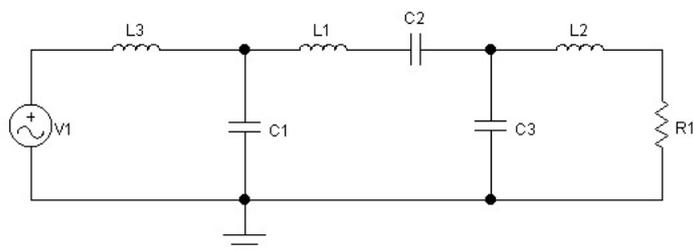


Рис. 2. Схема расширения полосы пропускания тракта излучения широкополосной антенны.

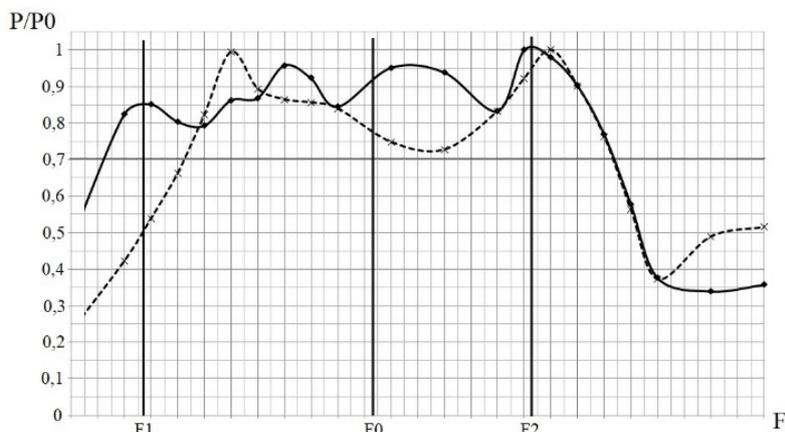


Рис. 3. Измеренные нормированные АЧХ макета широкополосной антенны с коррекцией АЧХ (сплошная линия) и без коррекции (штриховая линия), и в режиме излучения.

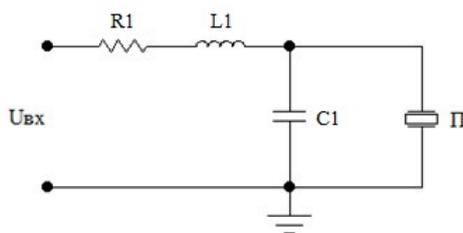


Рис. 4. Схема коррекции частотной характеристики излучающего канала (П — преобразователь).

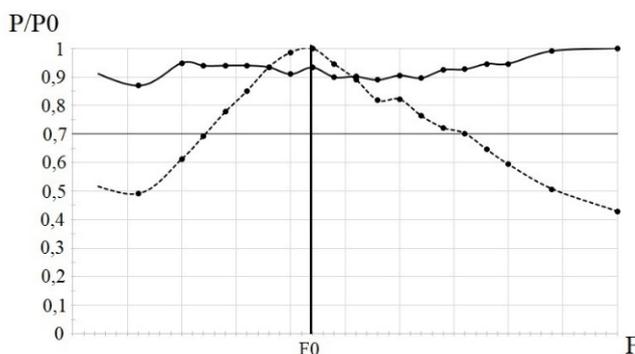


Рис. 5. Измеренные нормированные АЧХ макета излучающей антенны с коррекцией АЧХ (сплошная линия) и без коррекции (штриховая линия) в режиме излучения.

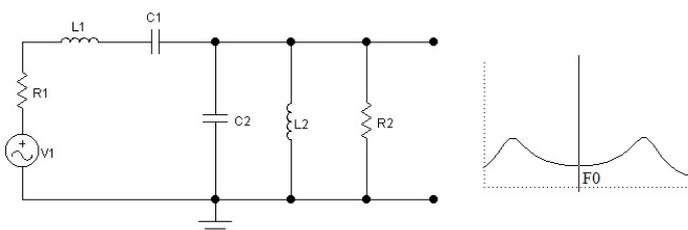


Рис. 6. Схема расширения полосы пропускания приемного тракта с однорезонансной антенной и вид АЧХ.

**Расширение полосы пропускания в режиме приёма.** Самым простым и, часто, оптимальным способом решения такой задачи как для однорезонансной, так и для широкополосной систем является включение добавочного дросселя параллельно статической емкости преобразователя. Пример такой схемы, а также вид АЧХ напряжения в режиме приема, снятой с резистора R2 и эквивалентной чувствительности антенны в режиме приема, представлены на рис. 6, где C2 — статическая емкость однорезонансного преобразователя, а L2 и R2 — добавочные дроссель и резистор. Такая схема обеспечивает подъем АЧХ в области более высоких и более низких частот относительно основного резонанса F0 антенны. Благодаря этому расширяется полоса пропускания антенны в целом. Юстировка номиналов дросселя L2 и резистора R2 при необходимости позволяет более точно управлять уровнем чувствительности и шириной рабочей полосы частот. Коррекция АЧХ такого типа часто применяется для приемных однорезонансных каналов. Измеренные нормированные АЧХ реального макета приемного канала с использованием приведенной схемы коррекции и без нее представлены на рис. 7. Такая схема позволяет расширить полосу пропускания приемного канала по уровню 0,707 в 2–3 раза.

Для коррекции частотной характеристики в режиме приема широкополосного преобразователя может использоваться схема такого же типа, дополненная операционным усилителем с частотно-зависимой отрицательной обратной связью (рис. 8). Дроссель L1 и резистор R1, включенные параллельно статической емкости преобразователя, используются для расширения полосы пропускания и увеличения уровня чувствительности в режиме приема. Коэффициент усиления приведенного усилителя увеличивается с увеличением частоты за счет резонансного контура в цепи обратной связи, настроенного на частоту выше рабочего диапазона частот антенны.

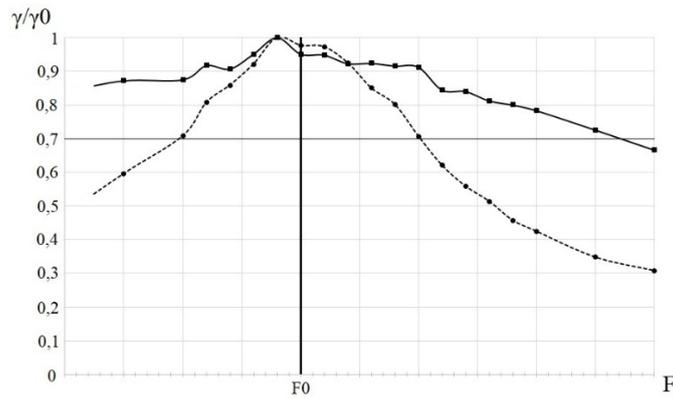


Рис. 7. Измеренные нормированные АЧХ макета приемной антенны с коррекцией АЧХ (сплошная линия) и без коррекции (штриховая линия) в режиме приема.

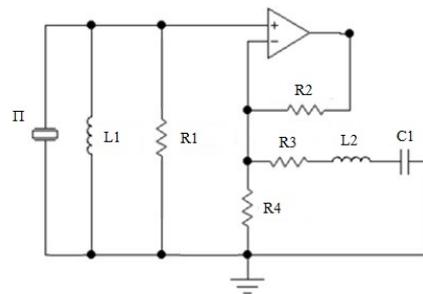


Рис. 8. Схема расширения полосы пропускания приемного тракта широкополосного преобразователя (П — преобразователь).

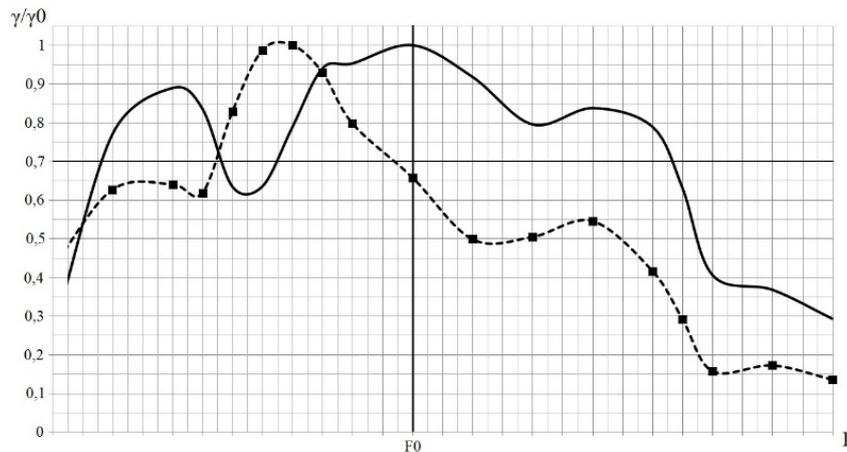


Рис. 9. Измеренные нормированные АЧХ чувствительности макета широкополосной антенны с коррекцией АЧХ (сплошная линия) и без коррекции (штриховая линия) в режиме приема.

Измеренные нормированные АЧХ чувствительности реального макета широкополосной антенны в режиме приема с применением данной схемы коррекции АЧХ и без коррекции представлены на рис. 9. За счет такого усилителя обеспечивается снижение неравномерности характеристики на высоких частотах в области, где второй резонанс в приеме не проявляется.

### Литература

1. Карлашук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: Солон-Р, 2000. 506 с.
2. Богданов Т. К., Стырикович И. И. Широкополосный стержневой пьезопреобразователь с использованием колебаний изгиба излучающей накладке и его эквивалентная схема замещения // Тр. Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. 600 с.

## СПОСОБ МИНИМИЗАЦИИ ДЛИН КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ДАТЧИКОВ ИЗ СОСТАВА МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ К ИСТОЧНИКАМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ПО ПЛОЩАДИ АКВАТОРИИ

*V. N. Mitin, Yu. E. Terekhov*, канд. физ.-мат. наук  
АО «Корпорация «Комета», Москва, Россия

## CABLE LINES LENGTH MINIMIZATION METHOD FOR CONNECTING SENSORS OF A MULTISTATIC UNDERWATER MONITORING SYSTEM WITH POWER SOURCES, DISTRIBUTED OVER AN AREA

*V. N. Mitin, Yu. E. Terekhov*, Ph.D.  
JSC «Corporation «Kometa», Moscow, Russia

*Разработан способ минимизации суммарной протяжённости кабельных линий, соединяющих множество датчиков и несколько источников электропитания между собой. Группа датчиков подключается к одному источнику с помощью кабельной линии с кольцевой топологией. Способ основывается на решении задачи коммивояжёра, учитывает ограничение на предельное число датчиков в линии, ограничения на длины участков линий между датчиками, ограничения на количество линий, подключаемых к одному источнику.*

*A method has been developed to minimize the total length of cable lines connecting a set of sensors and several power sources to each other. A ring topology is used to connect a subset of sensors with a power source. A method employs travelling salesman problem and accounts for maximum number of sensors in a ring; maximum cable length between two sensors; maximum number of rings for a singular power source.*

В настоящее время активно развивается применение многопозиционных систем для осуществления мониторинга обстановки с помощью распределённых по площади акватории датчиков. Датчики подключаются к источникам питания с помощью дорогостоящих кабельных линий. Поэтому на этапе проектирования многопозиционных систем следует уделить внимание поиску способа подключения датчиков к источникам питания с минимальной длиной кабельных линий для снижения стоимости готовой конструкции. Задача поиска оптимального способа подключения датчиков к источникам питания является задачей комбинаторной оптимизации [1] и её можно свести к задаче нескольких коммивояжёров [2]. Критерием оптимальности в таком случае будет являться минимальная суммарная длина кабельных линий, затрачиваемых на соединение датчиков с источниками питания.

Существует множество способов решения данной задачи. Её можно решить, к примеру, с использованием так называемого «жадного» алгоритма, или же с применением метода полного перебора. Данные алгоритмы просты и эффективны в решении задач коммивояжёра малой размерности (число расчётных точек  $<10$ ), однако если увеличивать объём входных данных в задаче, первый метод становится неэффективен по причине большой скорости накопления ошибки (так называемая «плата за жадность»), а использование второго метода при увеличении объёма входных данных экспоненциально увеличивает время работы алгоритма [3].

При разработке представленного в настоящей работе способа выдвигалось несколько требований: алгоритм должен успешно осуществлять поиск такого оптимального способа соединения датчиков и источников питания, при котором полученная общая суммарная длина кабельных линий была бы максимально приближена к минимально возможной; поиск такого оптимального способа соединения должен занимать как можно меньше времени; разработанный алгоритм должен выполнять предыдущие два требования для 30–100 датчиков. Исходя из заданных требований, решать поставленную задачу «жадными» алгоритмами или методом полного перебора нецелесообразно.

Исходная задача усложняется наличием нескольких источников питания. Данное условие фактически означает переход от рассмотрения классической задачи коммивояжёра к задаче нескольких коммивояжёров. Поэтому исходная задача была разделена на две части: кластеризацию датчиков и поиск оптимального способа подключения датчиков к источникам питания.

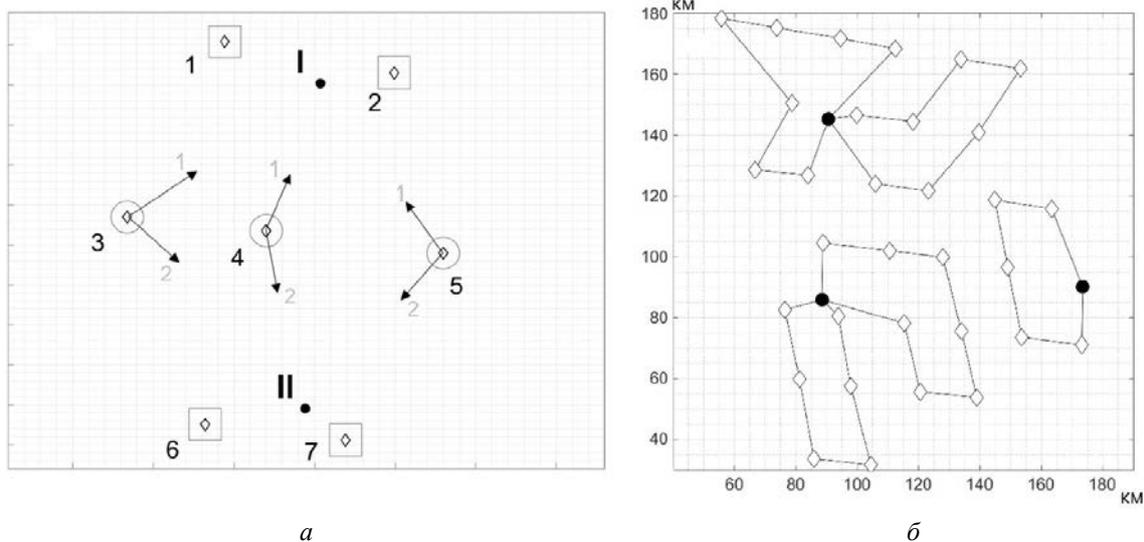


Рис. 1. Выбор «спорных» и «привязанных» датчиков.

Первая часть — кластеризация датчиков. Из исходной расстановки датчиков в акватории формируется несколько кластеров. Под кластером в данной задаче подразумевается объединение в одно множество источника питания и нескольких датчиков по принципу минимальной удалённости датчиков от отдельно взятого источника питания. Число полученных множеств (кластеров) равняется числу источников питания. К сожалению, для данного случая не существует чёткого алгоритма кластеризации: использование только критерия минимальной удалённости для объединения источников питания и датчиков в подмножества неэффективно. Поэтому кластеризация будет осуществляться человеком вручную — с использованием «спорных» и «привязанных» к источникам питания датчиков. Представление выбора «спорных» и «привязанных» датчиков (рис. 1, а), а также результат поиска оптимального способа подключения датчиков к источникам питания отображены на рис. 1: круглыми чёрными маркерами обозначены положения источников питания; ромбами — положения датчиков; датчики пронумерованы арабскими цифрами, источники питания — римскими; датчики, обведённые кругами — «спорные», квадратами — «привязанные»; для «спорных» датчиков стрелками с цифрами показаны возможные принадлежности к определённому источнику питания. Пример расположения датчиков и источников питания в ограниченной акватории с найденным оптимальным способом подключения (рис. 1, б). Многопозиционная система в примере состоит из трёх источников питания и 32 датчиков. Количество вариантов кластеризации равняется 1679616.

Под «спорным» датчиком подразумевается датчик, объединённый с определённым источником питания в кластер по принципу минимальной удалённости, но также имеющий возможность перехода в другой кластер (к другому источнику питания) из-за высокой интуитивной или эвристической оценки оператором возможного уменьшения суммарной длины кабельных линий после его перехода.

Под «привязанным» датчиком подразумевается датчик, объединённый с определённым источником питания в кластер по принципу минимальной удалённости, не имеющий возможности перехода в другой кластер (к другому источнику питания) из-за низкой интуитивной или эвристической оценки оператором возможного уменьшения суммарной длины кабельных линий после её перехода. Как правило, к «привязанным» датчикам относятся два-три ближайших к источнику питания датчика.

Применение «спорных» и «привязанных» датчиков позволяет получить большое количество оптимальных вариантов соединения датчиков с источниками питания для выбранной расстановки датчиков на акватории. В условиях отсутствия чётких методов кластеризации для решения исходной задачи, это является неоспоримым преимуществом. Однако, с другой стороны, методика применения «спорных» и «привязанных» к источникам питания датчиков частично смещает задачу в область перебора, что увеличивает время работы алгоритма поиска.

Вторая часть — поиск оптимального способа подключения датчиков и источников питания, для каждого отдельно выбранного кластера. Поиск минимальной протяжённости кабельной линии осуществляется решением замкнутой задачи с помощью метода имитации отжига [4]. Полученные минимальные протяжённости кабельных линий для всех кластеров суммируются и определяется итоговый оптимальный способ подключения датчиков к источникам питания.

Описанный алгоритм был реализован в среде MATLAB. Упрощённое описание алгоритма выглядит следующим образом:

1. Ручной выбор «спорных» и «привязанных» датчиков. Расчёт всех возможных комбинаций вариантов кластеризации датчиков.

2. Инициализация цикла вариантов кластеризации.

- 2.1. Для каждого варианта инициализируется цикл размером  $n$ , где  $n$  — число источников.

- 2.2. Для каждого  $n$ -источника питания выбираются принадлежащие ему датчики.

- 2.3. Методом перебора осуществляется поиск всех комбинаций разбиения датчиков по заданному числу кольцевых линий (если количество датчиков, принадлежащих источнику питания меньше или равно ограничению на максимальное количество датчиков в линии, также рассматривается вариант подключения датчиков с помощью одной линии).

- 2.4. Для каждой комбинации осуществляется поиск минимальной протяжённости кабельной линии с помощью функции, реализующей модифицированный метод имитации отжига. Данная функция является ядром алгоритма. Из полученных значений выбирается минимальное значение протяжённости кабельной линии для данного  $n$ -источника питания в данной комбинации кластеризации.

- 2.5. Вычисления по пп. 2.1–2.4 повторяются для всех источников питания.

3. Минимальная суммарная протяжённость кабельных линий для данного варианта кластеризации помещается в массив длин кабельных линий.

4. После расчёта протяжённостей для всех вариантов кластеризации из массива длин кабельных линий выбирается минимальное значение и соответствующий ей вариант кластеризации.

Для многопозиционной системы из трёх источников питания и 32 датчиков, представленной на рис. 1, б, было получено множество суммарных длин кабельных линий, соответствующих оптимальным способам подключения датчиков к источникам питания. Полученное множество можно использовать для построения гистограммы. Полученная гистограмма практически совпадает с нормальным распределением. В ходе расчёта было использовано 1679616 вариантов кластеризации датчиков и источников питания.

Кроме того, для расположения датчиков, представленного на рис. 1, б, определена зависимость изменения минимальной найденной суммарной длины кабельных линий в выбранном варианте от количества вариантов кластеризации. В этом случае была проведена серия расчётов: сначала использовалось малое число вариантов кластеризации (начиная с одного), а затем данное число в ходе расчёта постепенно увеличивалось до 1679616 вариантов кластеризации. Для каждого варианта кластеризации была выбрана и нанесена на график рис. 2, а минимальная длина кабельных линий.

Расчёт суммарной протяжённости кабельных линий для расположения датчиков и источников питания, представленного на рис. 1, б был проведён в среде MATLAB на компьютере с процессором Intel Core i7-4770K CPU 3.50GHz, 3501 МГц, ядер: 4; размер оперативной памяти 16 ГБ. Для разработанного алгоритма затраты времени на расчёт составили 28 мин. При одинаковых условиях, после замены метода имитации отжига на метод полного перебора, расчёт бы занял порядка десяти тысяч часов.

Полученные гистограммы аппроксимируются с помощью функции ядерного распределения (в среде MATLAB функция Kernel distribution) [5]. На совмещённом графике рис. 2, б были построены гистограммы и их аппроксимированные версии (законы распределения); далее к каждому распределению было применён закон «трёх сигм» для статистической оценки полученных результатов [6].

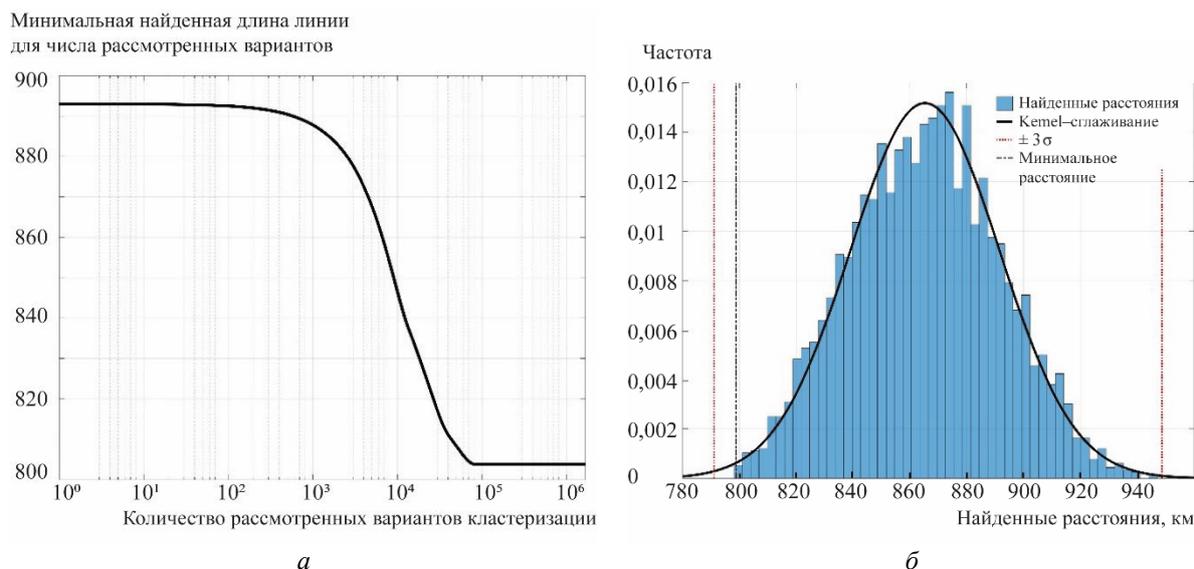


Рис. 2.

$a$  — зависимость изменения минимальной найденной суммарной длины кабельных линий от количества вариантов кластеризации;  $b$  — распределение изменения суммарной длины кабельных линий.

Представленный в настоящей работе способ минимизации длин кабельных линий имеет следующие преимущества и недостатки.

Преимущества алгоритма:

- 1) оператор сам определяет размерность задачи путём выбора количества «спорных» и «привязанных» датчиков;
- 2) отсутствует «рандомизация». То есть, при заданном варианте кластеризации вы гарантированно получаете глобальный минимум длины кабельных линий;
- 3) гибкость — имеется возможность изменения ограничений, накладываемых на алгоритм поиска и некоторых других параметров.

Недостатки алгоритма:

- 1) программная реализация алгоритма предполагает наличие ручной работы в части определения «спорных» и «привязанных» датчиков;
- 2) ввиду отсутствия четких методов кластеризации датчиков для дальнейшего решения в алгоритме используется методика «спорных» и «привязанных» датчиков, что частично смещает задачу в область перебора, увеличивая затраты времени на поиск;
- 3) найденное среди вариантов кластеризации значение минимальной протяжённости кабельных может являться точкой локального минимума.

### **Литература**

1. Garey M. R., Johnson D. S. Computers and Intractability // A Guide to the Theory of NP-Completeness. Freeman, San Francisco, 1979.
2. Гиманди Э. Х., Истомина А. М., Рыков И. А. О задаче нескольких коммивояжёров с ограничениями на пропускные способности графа // Дискретный анализ и исследование операций. 2013. Т. 20, № 5. С. 1.
3. mech.math.msu.su
4. Jeong C., Kim M. Fast Parallel Simulated Annealing for Travelling Salesman Problem on SIMD Machines with Linear Interconnections // Parallel Computing. 1991. Vol. 17. P. 221–228.
5. mathworks.com
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

## ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ КЛЮЧЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

С. А. Калашников

АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## ASSESSMENT OF WORK STABILITY OF SWITCH REGULATORS WITH NEGATIVE FEEDBACK

S. A. Kalashnikov

JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на ограничение допустимой глубины обратной связи в ключевых регуляторах с широтно-импульсной модуляцией. Проведен анализ методов введения комбинированной обратной связи по току и напряжению позволяющие, в ряде случаев, повысить устойчивость ключевых регуляторов в режимах граничного функционирования.*

*In article are considered the major factors influencing restriction of admissible depth of feedback in switch regulators with pulse-width modulation. The carried out analysis methods of introduction of the combined feedback on current and voltage allowing to increase stability in the modes of boundary functioning.*

Компенсационные методы стабилизации параметров силового электропитания генераторных устройств с использованием цепей отрицательной обратной связи является основным средством регулирования напряжения и ограничения тока ключевых преобразователей напряжения (КПН) в условиях наличия динамических факторов изменения нагрузки и напряжения объектовой сети [1]. Однако глубина компенсации дестабилизирующих факторов, как правило, ограничена условиями устойчивой работы, нарушение которых недопустимо, особенно в устройствах силового электропитания. Особенностью применения отрицательной обратной связи (ОС) в ключевых регуляторах напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) является как наличие выходного ФНЧ как минимум второго порядка, так и продуктов импульсного преобразования в тракте формирования широтно-модулированной последовательности импульсов.

Для фильтра нижних частот второго порядка «гипотеза фильтра», дополненная методом кратных частот, позволяет определить комплексный коэффициент передачи широтно-импульсного преобразователя и критическую глубину обратной связи при наличии входного гармонического воздействия. Суть метода кратных частот основана на подчеркивании в комплексном коэффициенте ШИМ-преобразования гармонических составляющих  $\Omega_n$  совпадающих с составляющими комбинационных частот:

$$\Omega_n = \omega - k \Omega_n . \quad (1)$$

Модулированное импульсное напряжение  $V$  представляет полигармонический сигнал, в спектре которого присутствуют высокочастотные составляющие гармоник частоты переключения  $k\omega$ , составляющие комбинационных частот  $k\omega \pm n\Omega$  и квазипостоянное напряжение  $K_0 U \Omega \sin(\Omega t + \theta)$ . Для случая кратных частот для целочисленных значений  $n\Omega = \omega/\Omega$  выполняется условие совпадения частот гармонических и комбинированных составляющих  $|k\omega \pm n\Omega| = \Omega$ , что соответствует изменению коэффициента передачи  $\hat{K}_{III}$  схемы ключевого усиления:

$$\hat{K}_{III} = K_0 \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ -(A_k + B_k) \cos \Theta_k + j(A_k - B_k) \sin \Theta_k \right] \right\} , \quad (2)$$

где  $A_k = \frac{4}{\pi k m} J_{-kn\Omega} + 1 \left( \frac{\pi k m}{2} \right) \cos \left[ k \pi \frac{t_0}{T} + (kn\Omega - 1) \frac{\pi}{2} \right]$ ;

$$B_k = \frac{4}{\pi km} J_{-kn\Omega}^{-1} \left( \frac{\pi km}{2} \right) \sin \left[ k\pi \frac{t_0}{T} + (kn\Omega + 1) \frac{\pi}{2} \right]; \quad \Theta_k = kn\Omega \left( \Theta + \frac{\pi}{2} \right) + k\omega t_H; \quad n\Omega = \omega/\Omega.$$

Таким образом, согласно методу кратных частот коэффициент передачи схемы ШИМ  $\hat{K}_{Ш}$  может иметь комплексный характер, причем его мнимая часть зависит как от относительной амплитуды  $m$  и постоянной составляющей  $t_0/T$  входного воздействия, так и от фазы сдвига между модулирующим напряжением и ШИМ сигналом.

Соответственно, для оценки необходимых условий устойчивости КПН с ШИМ, охваченного по выходному напряжению ФНЧ можно воспользоваться выражением, определяющим коэффициент передачи схемы охваченной обратной связью  $K_{ос}$  на кратных частотах:

$$K_{ос}(\Omega) = \frac{\hat{K}_{Ш}(\Omega) \cdot \hat{K}_{Ф}(\Omega)}{1 + \beta \hat{K}_{Ш}(\Omega) \hat{K}_{Ф}(\Omega) K_0}, \quad (3)$$

где  $\beta$  — коэффициент передачи цепи обратной связи.

Такое представление  $K_{ос}(\Omega)$  позволяет определить необходимые границы устойчивости из критерия Найквиста, включающего фазовое и амплитудное условия возбуждения:

$$\text{Im}(\hat{K}_{Ш} K_{Ф}) = 0; \quad \text{Re}(\beta \hat{K}_{Ш} \hat{K}_{Ф} K_0) \leq -1. \quad (4)$$

Здесь, прежде всего, следует исследовать устойчивость на второй моде частоты переключений при  $\Omega = 0,5\omega$ , где достигается максимальное изменение коэффициента  $\hat{K}_{Ш}$  по сравнению с исходным статическим коэффициентом передачи  $K_0$ :

$$K_{Ш \omega/2} = K_0 \left( 1 - \cos \pi \frac{t_0}{T} \cos \Theta' + j \cos \pi \frac{t_0}{T} \sin \Theta' \right); \quad \Theta' = 2\Theta + \pi + \omega t_H. \quad (5)$$

При этом фазовое условие возбуждения с учетом фазовой характеристики ФНЧ  $\varphi_{Ф}(\Omega)$  выполняется для  $\text{tg}\varphi_{Ш} - \text{tg}\varphi_{Ф} = 0$ , что соответствует равенству:

$$\text{tg}\varphi_{Ф} = \cos \left( \pi \frac{t_0}{T} \right) \cdot \sin \left[ \frac{\Theta'}{1 - \cos \pi t_0/T \cos \Theta'} \right]. \quad (6)$$

В результате из выполнения амплитудного условия возбуждения получим значение для критической глубины ОС:

$$K_{кр} = |1/\hat{K}_{Ф} \hat{K}_{Ш}| = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{\left[ (1 - \omega_0/2\Omega_0)^2 \right]^2 + (\omega_0/2\Omega_0 Q)^2}. \quad (7)$$

Соответственно глубина обратной связи  $F$  через ФНЧ второго порядка для частоты воздействия  $\Omega$  не превышает значений:

$$F = 1 + K_{Ф} K_{Ш} K_{кр} = 1 + \sqrt{\frac{\left[ (1 - \omega_0/2\Omega_0)^2 \right]^2 + (\omega_0/2\Omega_0 Q)^2}{\left[ (1 - \Omega/\Omega_0)^2 \right]^2 + (\Omega/\Omega_0 Q)^2}}. \quad (8)$$

Как следует из расчетных зависимостей максимальной глубины обратной связи, представленных на рис. 1, *a*, *б*, устойчивость КПН с ОС по напряжению ФНЧ от режима возбуждения на полутактовой возрастает с повышением отношения частоты переключений  $\omega_0$  к собственной частоте фильтра  $\Omega_0$  и уменьшается с ростом добротности  $Q$ . Дополнительным фактором, влияние которого может привести к режиму возбуждения на частотах близких к максимальному подъему АЧХ ФНЧ при фазовом сдвиге выходного напряжения близком к  $\pi$ , является наличие весьма малых дополнительных фазовых сдвигов, обусловленных задержками переключения элементов силового каскада, что может приводить к выполнению фазового условия возбуждения. Соответственно глубина обратной связи  $F$  через ФНЧ второго порядка для частоты воздействия  $\Omega$  не превышает значений:

$$F = 1 + K_\phi K_{ш} K_{кр} = 1 + \frac{1/\Omega_0^2 \tau_3^2 + 1/Q^2 - 1/\Omega_0 \tau_3 Q^3}{\sqrt{\left[ (1 - \Omega/\Omega_0)^2 \right]^2 + (\Omega/\Omega_0 Q)^2}}, \quad (9)$$

где  $\tau_3$  — величина задержки.

$$K_T \beta_T \cdot di(t) / dt < dU_{II} / dt ; \quad \frac{di_L(t)}{dt} = \begin{cases} -E(1-m)/2L, & \text{для } t < t_{II} \\ Em/2L & \text{для } t < t_{II} \end{cases} \quad (10)$$

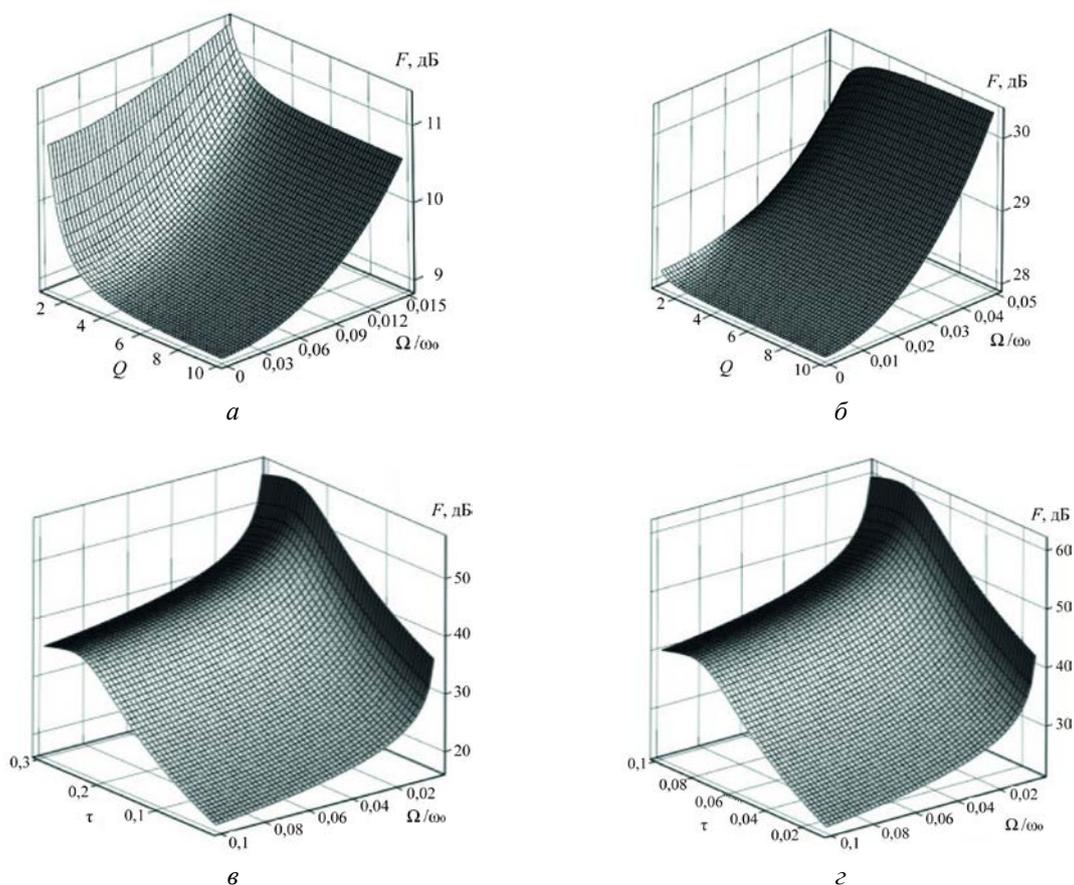


Рис. 1. Зависимость глубины обратной связи от нормированной частоты  $\Omega / \omega_0$  добротности  $Q$  ФНЧ при соотношении  $\Omega_0 / \omega_0$ , относительной величины задержки  $\tau$  при  $Q=10$  и соотношении  $\Omega_0 / \omega_0$ .

*a* — при соотношении  $\Omega_0 / \omega_0 = 0,3$ ; *б* — при соотношении  $\Omega_0 / \omega_0 = 0,1$ ;

*в* — при соотношении  $\Omega_0 / \omega_0 = 0,3$ ; *г* — при соотношении  $\Omega_0 / \omega_0 = 0,1$ .

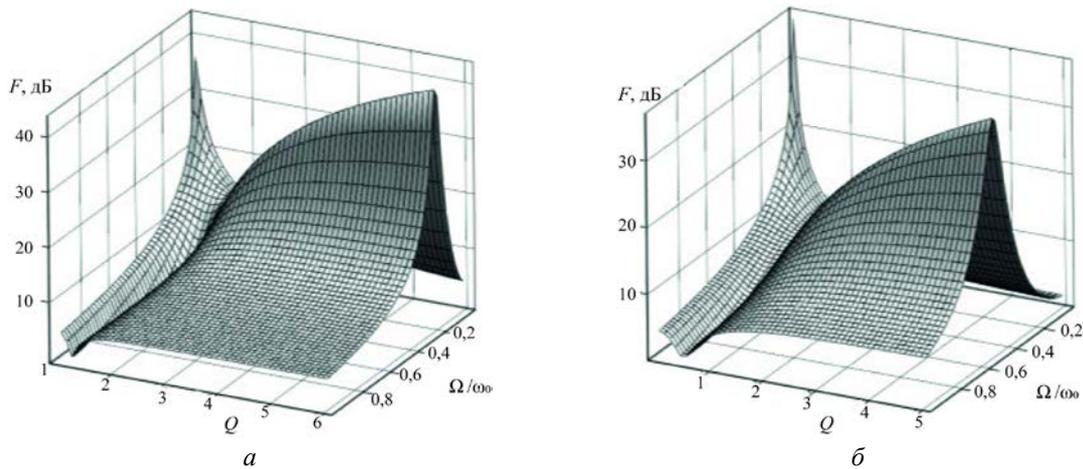


Рис. 2. Зависимость глубины обратной связи от нормированной частоты  $\Omega / \omega_0$  и добротности  $Q$  ФНЧ при соотношении  $\Omega_0 / \omega_0$ .

$$a - \Omega_0 / \omega_0 = 0,2; \quad b - \Omega_0 / \omega_0 = 0,5.$$

На рис. 1, в, г приведены зависимости глубины обратной связи, определенной из фазового условия возбуждения для типовых параметров КПН. При обратной связи по току дросселя имеет место значительное проникновение ВЧ продуктов импульсного преобразования в тракт ШИМ преобразования, что может приводить к кратному возрастанию частоты переключений. Такой процесс, определенный как режим ВЧ возбуждения, имеет место при превышении скорости изменения разностного сигнала, поступающего на вход широтно-импульсного преобразователя, скорости спада либо нарастания опорного пилообразного напряжения  $U_{\text{л}}$ . Исключение режима ВЧ возбуждения при обратной связи по току (ОСТ) связано с выполнением условия:

Полагая коэффициент передачи схемы ключевого усиления  $K_{\text{ш}} = E / U_{\text{пм}}$  для граничных значений  $m = 0; 1$ , из (10) получим необходимый критерий устойчивости для КПН с ОСТ:

$$\beta_{\text{T}} K_{\text{T}} K_{\text{ш}} K_0 < 4L / T = 2L\omega_0 / \pi. \quad (11)$$

С учетом (11) выражение для глубины ОСТ может быть определено в следующем виде:

$$F(\Omega) = 1 + \frac{2\omega_0 \sqrt{1 + (\Omega/\Omega_0)^2 (Q + Q(\Omega/\Omega_0)^2 - 1/Q)^2}}{\pi Q \Omega_0 (1 - (\Omega/\Omega_0)^2)^2 + (\Omega/\Omega_0 Q)^2}. \quad (12)$$

Сопоставление трехмерных графиков критической глубины ОС по току дросселя ФНЧ (рис. 2) и по выходному напряжению (рис. 1) показывают возможность кратного повышения стабилизации тока особенно при низких частотах внешнего возбуждения. Выделенное обстоятельство открывает возможности использования комбинированных цепей ОС по току дросселя ФНЧ и по выходному напряжению. Именно такой подход является наиболее предпочтительным для использования в устройствах силового электропитания генераторных устройств.

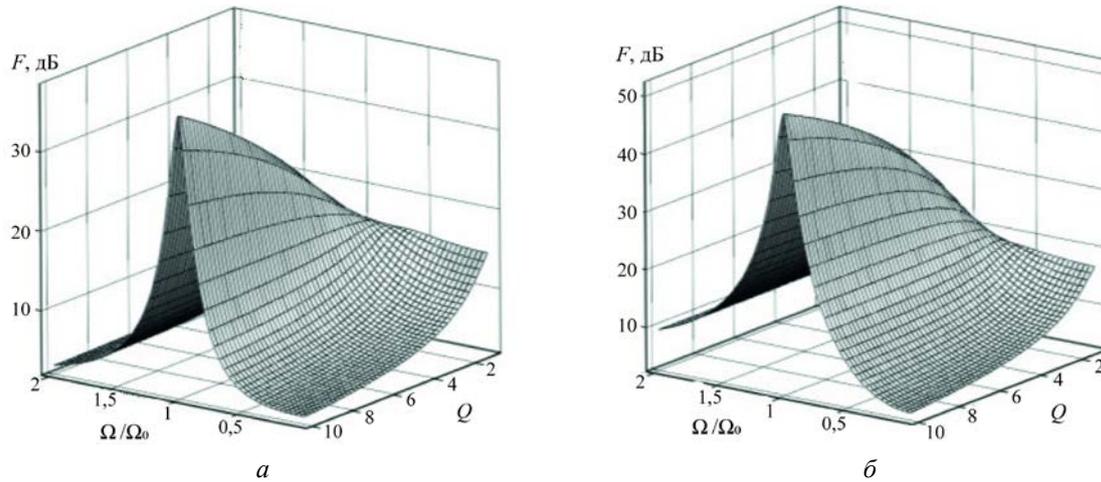


Рис. 3. Зависимость глубины обратной связи от нормированной частоты  $\Omega/\omega_0$  и добротности  $Q$  ФНЧ при соотношении  $\Omega_0/\omega_0$ .

$a$  —  $\Omega_0/\omega_0 = 0,2$ ;  $б$  —  $\Omega_0/\omega_0 = 0,5$ .

Наиболее простым образом может быть реализована суммарная результирующая ОС, где разностный сигнал формируется как результат суммирования опорного канала  $U$  и отрицательных сигналов с выходов цепей ОС по напряжению и току с соответствующими коэффициентами передачи  $\beta_u$  и  $\beta_i$ . В результате выражение глубины обратной связи при комбинированной ОС по напряжению и току ФНЧ может быть записано в следующем виде:

$$F(\Omega) = 1 + F_{кр} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2 + \frac{\beta'_i}{\beta_u}\right]^2 + \left[\frac{\Omega}{\Omega_0 Q} + \frac{\beta'_i}{\beta_u} \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} Q + \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^3 Q - \frac{\Omega}{\Omega_0 Q}\right)\right]^2} / \left(\left[1 - \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_0 Q}\right)^2\right). \quad (13)$$

Данные расчета полученной аналитической зависимости для типовых значений  $\Omega_0 = (0, 2; 0, 5)\omega_0$  приведены на рис. 3.

Проведенный анализ предельных значений глубины обратной связи по току и напряжению в ключевых регуляторах с учетом параметров нагрузки подтверждает существенные ограничения использования компенсационных методов стабилизации выходного напряжения при подавлении динамических возмущений не более чем на 10–12 дБ, что заставляет обратиться к методам параметрического регулирования. Наибольший практический интерес представляет переход к комбинированной обратной связи, позволяющей повысить глубину стабилизации до 20 дБ при возможности ограничения выходного тока в режимах перегрузки.

#### Литература

1. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания / Пер. с англ., под ред. Л. Е. Смольникова. М.: Энергоатомиздат. 1988. 294 с.

## ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА ОБРЫВА ТОКА ДРОССЕЛЯ ФИЛЬТРА НА АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛЮЧЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

*P. C. Григорьев, С. А. Калашников, Д. И. Шустимов*  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## INFLUENCE OF THE FACTOR CURRENT BREAK OF FILTER CHOKE ON AMPLITUDE RESPONSES OF SWITCH CONVERTERS

*R. S. Grigorev, S. A. Kalashnikov, D. I. Shustimov*  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*В статье проведен анализ искажений регулировочных характеристик одноктных ключевых регуляторов вследствие эффекта обрыва тока дросселя ФНЧ, приводящих к снижению динамического диапазона регулирования и ухудшению стабилизационных характеристик. Показана целесообразность применения обратимых одноктных регуляторов на примере полумостовых схем.*

*In article the analysis of distortions regulation curves of single-cycle switch regulators owing to effect of low-pass filter choke current break, decrease in dynamic control band and characteristic of stability. Is shown expediency of use reversible single-cycle regulators on the example of semi-bridge schemes.*

Существует широкое многообразие разнотипных ключевых регуляторов напряжения (КРН), включающих прямоходовые и обратногоходовые ключевые регуляторы и стабилизаторы напряжения, стабилизированные и нестабилизированные конвертеры с «жесткими» и «мягкими» траекториями переключений, с модуляцией длительности, частоты и фазы импульсов, а также различные варианты многозвенных и многоканальных схем последовательного и параллельного преобразования напряжения и сложения выходной мощности [1]. Для наиболее энергоемких устройств силовой электроники большой мощности (до 15 кВт), характерных для электропитания усилителей мощности передающих трактов гидроакустических комплексов, несомненное предпочтение отдается одноктным прямоходовым схемам ключевых стабилизаторов напряжения (КСН), обладающим максимальной энергетической эффективностью и простотой реализации. Принцип действия типового одноктного КРН, при непрерывном токе дросселя для квазистатического режима в условиях пренебрежимо малых остаточных напряжений на открытых полупроводниковых приборах может быть определен рекуррентным соотношением:

$$V(t) = \begin{cases} E, & \text{для } t \in [t'_k; t''_k], \\ 0, & \text{для } t \in [t''_k; t'_{k+1}], \end{cases} \quad (1)$$

где  $E$ ,  $V(t)$  — напряжение электропитания и импульсное напряжение на входе дросселя ФНЧ;  $t'_k$ ,  $t''_k$  — моменты времени, соответствующие фронту и спаду импульсного напряжения для  $k$ -го периода переключений.

Соответственно, напряжение  $U_n$  на выходе ФНЧ определяется средним значением импульсного напряжения:

$$U_n = E \cdot t_n / T, \quad (2)$$

где  $t_n = t''_k - t'_k$  — длительность импульса;  $T = t'_{k+1} - t'_k$  — период переключений.

В одноктном прямоходовом КРН обеспечивается транзисторная либо диодная проводимость тока дросселя  $i_L$  поочередно по временным интервалам  $t_n$  и  $t_p$  ( $t_p = t'_{k+1} - t''_k$  — длительность паузы), временные диаграммы, поясняющие работу КСН: *a* — в режиме непрерывного тока дросселя; *b* — в режиме обрыва тока через диод (*b*) представлены на рис. 1. В одноктной схеме КСН обрыв тока дросселя приводит к значительным искажениям амплитудной характеристики регулирования, нарушая пропорциональность зависимости  $U_n = m E$ . Условие перехода от зоны линейного регулирования к зоне обрыва тока определяется равенством амплитуды ВЧ тока дросселя  $i_{вм}$  уровню низкочастотного тока  $i_n$ .

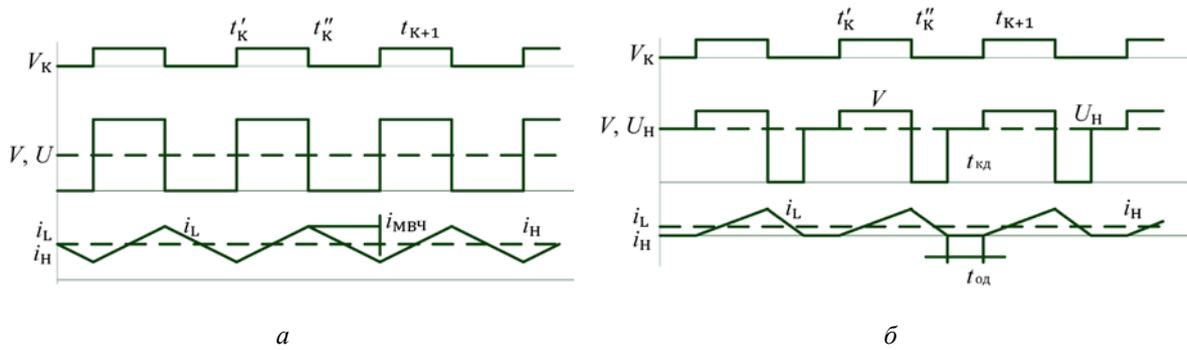


Рис. 1. Временная диаграмма сигналов, поясняющих работу КСН.

*a* — в режиме непрерывного тока дросселя; *б* — в режиме обрыва тока через диод.

$$E(1-m) m T / 2 L = E m / R_n. \quad (3)$$

Откуда получим выражение граничного значения  $m_d$  индекса модуляции  $m$ :

$$m_d = 1 - 2 L / T R_n > 0. \quad (4)$$

Следует отметить, что при отношении  $2 L / T R_n > 1$  обрыв тока дросселя не наблюдается. Вместе с тем, в режиме близком к холостому ходу  $R_n \gg 2 L / T$  обрыв тока имеет место даже при весьма больших индексах модуляции. В общем случае при обрыве тока во время паузы  $t_p$  между импульсами после интервала  $t_d$  проводимости обратного диода можно выделить интервал  $(t_p - t_d)$ , во время которого ключевые элементы находятся в закрытом состоянии, что приводит к фиксации в импульсном напряжении  $V$  уровня напряжения  $U_n$  конденсатора фильтра нижних частот (ФНЧ). При этом рекуррентное выражение (1) для  $k$ -ого периода переключений приводится к следующему виду:

$$V(t) = \begin{cases} E & \text{для } t \in [t'_k; t''_k] \\ 0 & \text{для } t \in [t''_k; t_{dk}] \\ U_n & \text{для } t \in [t_{dk}; t''_k] \end{cases}. \quad (5)$$

В зоне регулирования КРН с обрывом тока дросселя за время импульса ток потребления от источника питания линейно возрастает от нуля до максимального значения  $i_{Lm}$  при величине энергии потребления:

$$W_0 = t_n E i_{Lm} / 2, \quad (6)$$

где  $i_{Lm} = (E - u) t_n / L$ .

В условиях пренебрежимо малых потерь энергии в схеме КСН мощность на нагрузке можно принять равной мощности потребления. Соответственно в первом приближении для периода переключений выполняется равенство:

$$t_n E (E - U_n) t_n / 2 L = U_n^2 T / R_n. \quad (7)$$

Откуда для нормированной величины  $\chi = U_n / E$ :

$$\chi^2 + \chi m^2 T R_n / 2 L - m^2 T R_n / 2 L = 0. \quad (8)$$

Решение уравнения запишем в следующем виде:

$$\chi = \frac{m^2}{2\gamma} \sqrt{1 + 4\gamma / m^2} - 1, \quad (9)$$

где  $\gamma = 2L / TR_n$ .

Коэффициент  $\gamma$  соотношение параметров схемы и нагрузки. Для удобства анализа целесообразно ввести коэффициент  $\gamma_0$  для работы КРН на номинальную нагрузку  $R_0$ , что позволяет ввести в зависимость относительную величину нагрузки  $G_H = R_0 / R_H$ :

$$\chi = \frac{m^2}{2\gamma_0 G_H} (\sqrt{1 + 4\gamma_0 G_H / m^2} - 1). \quad (10)$$

Зависимость регулировочной характеристики от глубины модуляции и соотношения параметров схемы и нагрузки представлена на рис. 2, а. Удобней пользоваться зависимостью от нагрузки при заранее выбранном оптимальном фильтре, на рис. 2, б представлена зависимость регулировочной характеристики в диапазоне изменения величины относительной нагрузки от 0 до 1, что соответствует режиму работы от холостого хода до номинальной нагрузки. Для обратного КСН, выполненного, например, на полумостовой схеме, искажения амплитудной характеристики вследствие обрыва тока дросселя имеет место только во время интервала  $\tau$  задержки фронта импульса управления транзистором, включенным параллельно обратному диоду. Введение таких задержек включения транзисторов является обязательным условием исключения сквозных токов транзистор–транзистор, недопустимых при работе ключевого усилителя мощности (КУМ) особенно при высоком напряжении электропитания. Функциональная схема обратимого КРН с задержкой фронта импульсов управления полумостовой схемы КУМ приведена на рис. 3, а. Временные диаграммы сигналов, поясняющие его работу, приведенные на рис. 3, б; иллюстрируют формирование импульсов  $V_K$  и  $\bar{V}_K$  для управления верхним и нижним транзисторами полумостовой схемы из выходных сигналов ШИМ посредством задержки  $\tau_3$  фронта прямого и инверсного сигналов  $V_{ШИМ}$ . Соответственно, между интервалами открытых состояний транзисторов КУМ образуются временные интервалы  $\tau_3$ , где оба транзистора закрыты при сохранении только диодной проводимости.

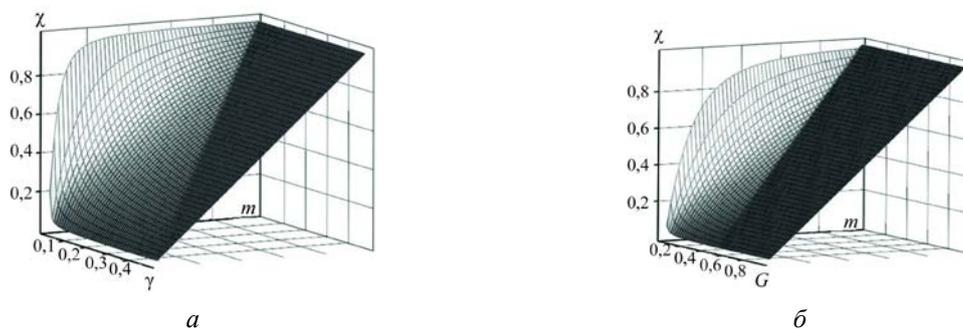


Рис. 2. зависимость регулировочной характеристики от глубины модуляции и коэффициента  $\gamma$  (а) и относительной величины нагрузки  $G$  (б).

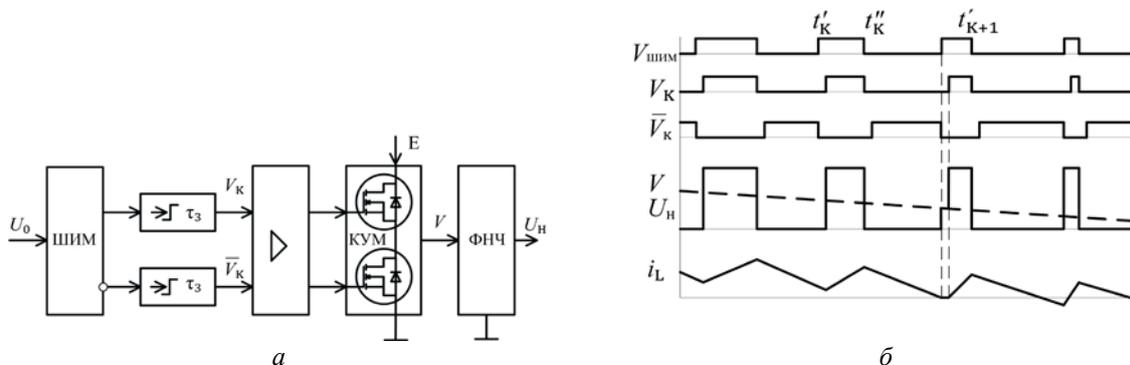


Рис. 3. Функциональная схема обратимого КРН с задержкой фронта импульсов управления (а) и временные диаграммы сигналов, поясняющие его работу (б).

Наличие такой задержки включения транзисторов, как показано на рис. 3, б; в условиях прямой проводимости КРН для  $i_L > 0$  приводит к смещению фронта напряжения  $V$  на выходе КУМ на интервал  $\tau_3$  относительно фронта импульсов  $V_{\text{шим}}$ . Соответственно уменьшается длительность импульсного напряжения:

$$V = \begin{cases} E & \text{при } t \in [(t'_k - \tau_3); t''_k] \\ 0 & \text{при } t \in [t''_k; (t'_{k+1} + \tau_3)] \end{cases} \quad (11)$$

В результате имеет место смещение амплитудной характеристики регулирования КРН:

$$U_H = (m - \delta_m) E, \quad (12)$$

где  $\delta_m = \tau_3 / T$  — относительный сдвиг модуляционной характеристики.

При этом на такую же величину смещается граничное значение индекса модуляции  $m_d$  (3), а решение уравнения (9), определяющего изменение относительного выходного напряжения КРН в зоне обрыва тока может быть получено в следующем виде:

$$\chi = \frac{(m - \delta_m)^2}{2\gamma_0 G_H} (\sqrt{1 + 4\gamma_0 G_H / (m - \delta_m)^2} - 1). \quad (13)$$

Зона обрыва тока дросселя обратного КРН весьма незначительная и заканчивается с восстановлением пропорциональности модуляционной характеристики  $\chi = m$ . Выделенное обстоятельство объясняется тем, что при спаде тока  $i_L$  до нуля во время открытого состояния нижнего транзистора, ток меняет знак и может увеличиться к моменту  $t'_{k+1}$  его выключения до уровня  $i_{Lk}$  достаточного для поддержания обратного тока через диод верхнего транзистора в емкость источника электропитания:

$$|i_{Lk}| > (E - U_H) \tau_3 / L = (1 - m) \delta_m E T / L. \quad (14)$$

При этом  $i_{Lk}$  в момент времени  $t'_k$  принимает отрицательное значение, а его величина определяется как разность низкочастотного тока нагрузки и амплитуды ВЧ тока дросселя:

$$i_{Lk} = E m / R_H - E (1 - m) m T / 2 L. \quad (15)$$

Таким образом, граничное значение  $m_k$ , соответствующее завершению зоны обрыва тока и перехода к пропорциональной модуляционной характеристике определяется из условия равенства соотношений (14) и (15) в следующем виде:

$$m_k = \frac{\gamma - 2\delta_m \gamma - 1 + \sqrt{4\delta_m^2 \gamma^2 + \gamma^2 + 8\delta_m \gamma - 2\gamma + 1}}{2\gamma}. \quad (16)$$

В свою очередь значение индекса модуляции  $m_d$  (3), соответствующего началу зоны обрыва тока с учетом смещения модуляционной характеристики для  $i_L > 0$  определяется выражением:

$$m_d = 1 + \delta_m - 2\gamma. \quad (17)$$

Зависимость регулировочной характеристики от глубины модуляции и соотношения параметров схемы и нагрузки для максимальной на практике относительной величине задержки 0,1 представлена на рис. 4.

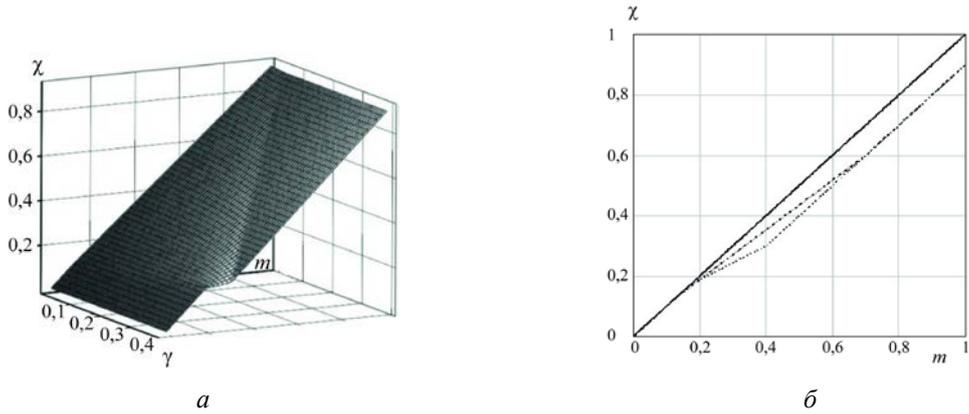


Рис. 4. Зависимость регулировочной характеристики от глубины модуляции и коэффициента  $\gamma$  для относительной величины задержки.

$a$  — относительная величина задержки — 0,1;  $б$  — аналогичные двумерные зависимости от глубины модуляции при коэффициентах  $\gamma = 1$  — сплошная линия;  $\gamma = 0,3$  — штрих-пунктирная;  $\gamma = 0,1$  — пунктирная.

Проведенный в статье анализ искажений регулировочных характеристик одноконтурных ключевых регуляторов показывает целесообразность применения обратимых одноконтурных регуляторов на примере полумостовых схем.

#### *Литература*

1. Александров В. А., Калашников С. А., Игнатьев К. В. Ключевые нормализаторы напряжения электропитания гидроакустической аппаратуры // Тр. 14 Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2018. С. 125–127.

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ РАЗНОТИПНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ В СОСТАВЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

*В. А. Александров, д-р техн. наук, Ю. В. Казаков, Л. В. Маркова*  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## FEATURES OF THE OPERATION OF VARIOUS TYPES OF POWER AMPLIFIERS AS PART OF HYDROACOUSTIC TRANSMITTING DEVICES

*V. A. Alexandrov, Dr.Sc., Yu. V. Kazakov, L. V. Markova*  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Представлены результаты исследований потерь энергии в линейных и ключевых усилителях при работе на гидроакустический излучатель. Дано сравнение относительных потерь энергии со звеном рекуперации и без него в линейных усилителях. Проанализированы энергетические характеристики линейных и ключевых усилителей мощности, показана перспектива использования усилителей класса D для устройств большой мощности в гидроакустических передающих трактах (ГАПТ).*

*The results of studies of energy losses in linear and switch amplifiers when operating on hydroacoustic emitter are presented. A comparison is made of the relative energy losses with and without recuperation link in linear amplifiers. The energy characteristics of linear and switch power amplifiers are analyzed, the prospect of using class D amplifiers for high power devices in hydroacoustic transmission paths (HATP) is shown.*

Основным требованием, предъявляемым к аппаратуре гидроакустического передающего тракта (ГАПТ), является повышение энергетической эффективности наиболее энергоемких узлов — усилительных устройств, для выполнения условия ограничения тепловыделения и минимизации габаритов аппаратуры. Основные потери энергии в усилителях обусловлены комплексным характером импеданса гидроакустического излучателя. Таким образом, полная выходная мощность усилителя имеет реактивную составляющую, процесс рекуперации которой является определяющим для энергетической эффективности передающей аппаратуры. Рассмотрим различные классы усилителей, позволяющих рекуперировать энергию. Наиболее простым является усилитель класса *B* с дополнительным звеном линейного усиления для разряда конденсатора  $C_H$ . Функциональная схема (рис. 1) содержит источник питания (ИП), предварительный усилитель (ПУ), полумостовой линейный усилитель мощности (ЛУМ),  $RC$  — нагрузку (Н), сумматор, цепь обратной связи (ОС), датчик тока (ДТ) и дополнительное звено линейного усиления (ЛУМ-Р).

Относительные потери мощности  $p$  при работе на комплексную нагрузку  $Z$  определяются, как:

$$P_Z = (mE)^2 / 2Z; P_T = P_0 - P_R; p = P_T / \text{Max}|P_Z|, \quad (1)$$

где  $m$  — относительная амплитуда выходного напряжения  $U$ ;  $E$  — напряжение питания;  $P_0$ ,  $P_R$ ,  $P_T$ ,  $P_Z$  — мощности потребления, выделяемая в активной нагрузке, тепловыделения, максимальная полная выходная мощность усилителя соответственно.

При фазовом сдвиге  $\varphi$  выходного тока и напряжения на нагрузке, потери энергии в усилителях класса *B* резко возрастают (рис. 2, *a*). Уменьшить остаточное напряжение в фазовом интервале  $\varphi$  позволяет использование звена разряда емкости нагрузки на общую шину устройства (рис. 2, *б*). Относительные потери мощности для классического случая выражаются следующим образом:

$$p(\varphi, m) = m[4/\pi - m \cos(\varphi)]. \quad (2)$$

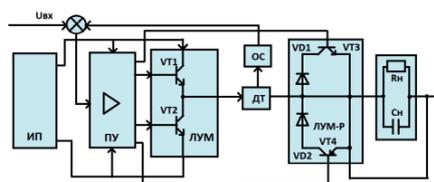


Рис. 1. Усилитель класса *B*.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

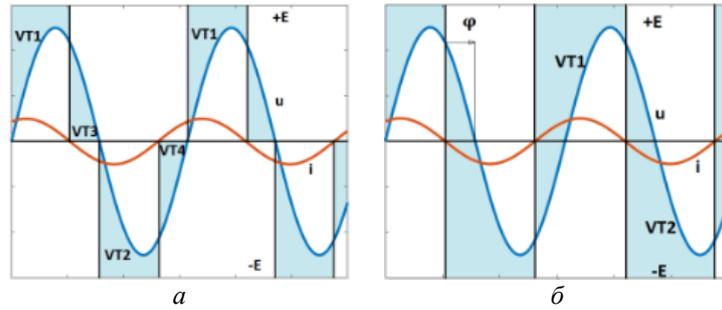


Рис. 2. Диаграммы сигналов в усилителе класса В, в том числе с использованием звена ЛУМ-Р для разряда емкости нагрузки.

*a* — диаграммы сигналов в усилителе класса В; *б* — в том числе с использованием звена ЛУМ-Р для разряда емкости нагрузки.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

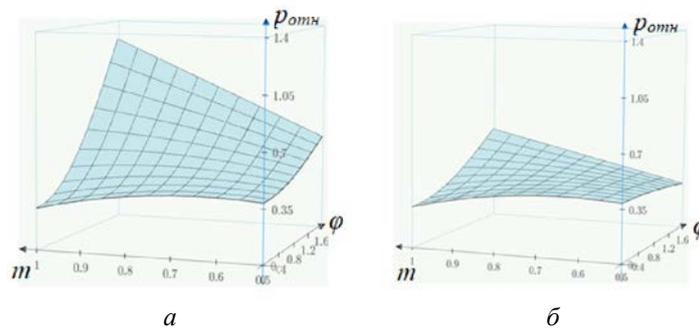


Рис. 3. Зависимости относительных потерь энергии от изменения фазового сдвига  $\varphi = 0 \dots \pi/2$  для нормированной амплитуды выходного напряжения  $m = 0,5 \dots 1$  усилителя класса В и усилителя класса В с дополнительным звеном линейного усиления.

*a* — для усилителя класса В; *б* — усилителя класса В с дополнительным звеном линейного усиления.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

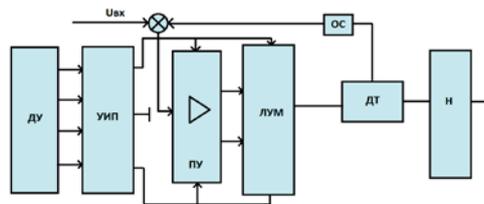


Рис. 4. Усилитель класса G.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Выражение для потерь энергии усилителя класса В с дополнительным линейным звеном:

$$p(\varphi, m) = m[2/\pi + (2/\pi - m) \cos(\varphi)]. \quad (3)$$

Зависимости потерь энергии для усилителя класса В иллюстрируются на рис. 3, *a*, *б*. Сопоставление графиков подтверждает двукратное сокращение потерь энергии при использовании разряда емкости нагрузки на общую шину. Ввиду усложнения схемы, может оказаться целесообразным переход к усилителю класса G [1]. Функциональная схема (рис. 4) включает дискриминатор уровня (ДУ) выходного напряжения, управляемый источник питания (УИП), предварительный усилитель (ПУ), линейный усилитель мощности (ЛУМ) с окончательным каскадом, аналогичным усилителю класса В, датчик тока (ДТ), цепь обратной связи (ОС) и сумматор [2, 3].

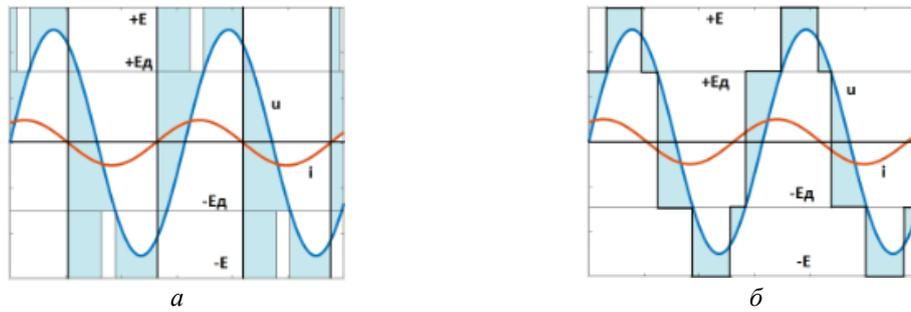


Рис. 5. Диаграммы сигналов в усилителе класса  $G$  (а), в том числе с использованием дополнительного звена рекуперации энергии (б).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

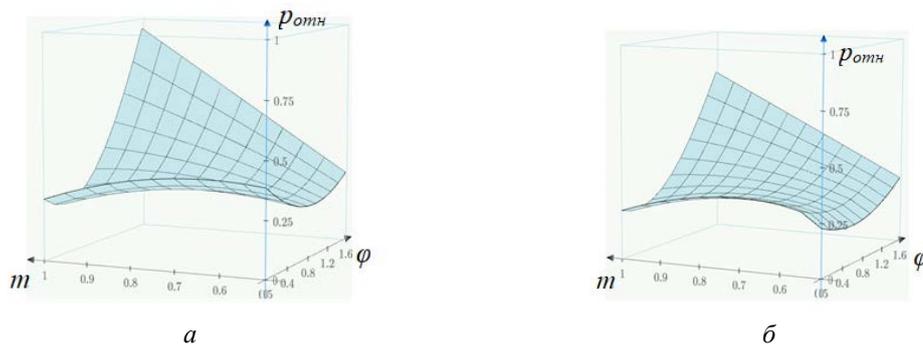


Рис. 6. Зависимости относительных потерь энергии  $p$  от изменения фазового сдвига  $\varphi = 0 \dots \pi/2$  для нормированной амплитуды выходного напряжения  $m = 0.5 \dots 1$  усилителя класса  $G$  (а) и усилителя класса  $G$  с рекуперацией реактивной энергии нагрузки (б) при степени переключения питания  $\xi_1 = 0,5$ .

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

На рис. 5, а можно видеть значительное увеличение остаточного напряжения на фазовом интервале  $\varphi$ , аналогичное усилителю класса  $B$  без дополнительных звеньев распределения энергии. Здесь выигрыш от дополнительной ступени электропитания  $E_d$  связан с исключением малого сегмента потерь на интервале заряда емкости нагрузки до напряжения  $E_d$ . Нормированные потери в традиционном усилителе класса  $G$  могут быть представлены, как:

$$p(\varphi, m) = 4m/\pi [1 - m \cos(\varphi\pi/4) - 0,5(1 - \xi_1) \times (1 - (\sqrt{m^2 - (\xi_1)^2}/m \cos \varphi - \xi_1/m \sin \varphi)], \quad (4)$$

где  $\xi_1 = E_d/E$  — относительная величина дополнительной ступени электропитания ( $\xi_1 < m < 1$ ).

Анализ зависимости  $p(\varphi, m)$  показал, что выигрыш повышения энергетической эффективности становится практически ничтожным с увеличением фазового сдвига между током и напряжением нагрузки. Уменьшить мощность тепловыделения в усилителе класса  $G$  позволяет реализация технических средств рекуперации реактивной энергии нагрузки (рис. 5, б). Нормированные потери энергии для  $\xi_1 < m < 1$  определяются следующим образом:

$$p(\varphi, m) = 2m/\pi [(\xi_1 + 1)(1 - \sin \varphi \xi_1/m - \cos \varphi \sqrt{m^2 - (\xi_1)^2}/m) + (\xi_1/m \sin \varphi + \cos \varphi \sqrt{m^2 - (\xi_1)^2}/m - \cos \varphi)]. \quad (5)$$

Зависимость потерь энергии для  $\xi_1 = 0,5$  представлена в виде графиков на рис.6, а, б.

Из сопоставления рис. 6, а и б следует, что в случае рекуперации достигается более чем двукратное понижение максимальной величины потерь. Еще более существенный эффект от использования рекуперации энергии реактивной составляющей мощности нагрузки может быть обеспечен в усилителе класса  $H$  [4], реализованный, например, по схеме [5], представленной на

рис. 7. В состав усилительного устройства входят: основной источник питания (ИП), ключевой усилитель мощности (КУМ), дополнительный гальванически развязанный источник питания (ГРИП), гальванически развязанный предварительный усилитель (ГРПУ), линейный усилитель мощности (ЛУМ), нагрузка, цепь обратной связи (ОС) по выходному напряжению и сумматор. Увеличение потерь энергии наглядно демонстрируется на рис. 8, а и имеет характер, присущий усилителям класса *B*, *G*. Потери энергии могут определяться, как:

$$p(\varphi, m) = m[4\Delta\xi + 2m(\sin(\varphi) - \varphi\cos(\varphi))]/\pi, \quad (6)$$

где  $\Delta\xi = \Delta E/E$  – относительное изменение электропитания.

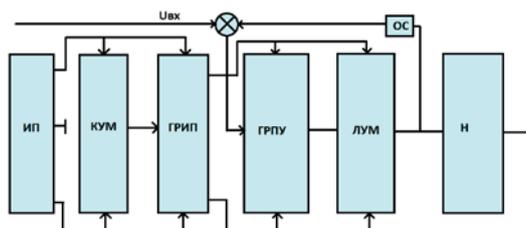


Рис. 7. Усилитель класса *H*.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

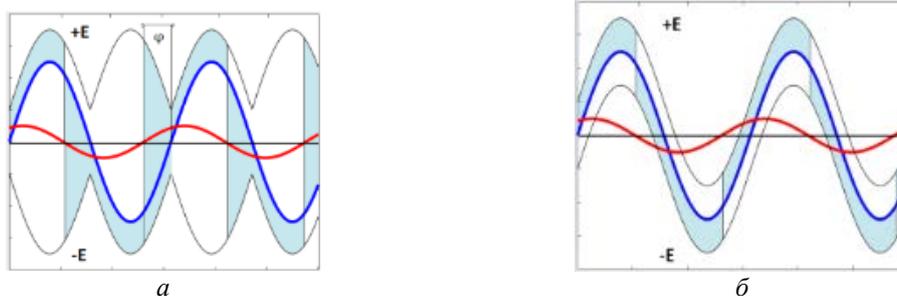


Рис. 8. Диаграммы сигналов в усилителе класса *H* (а), в том числе с использованием звеньев рекуперации энергии (б).  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

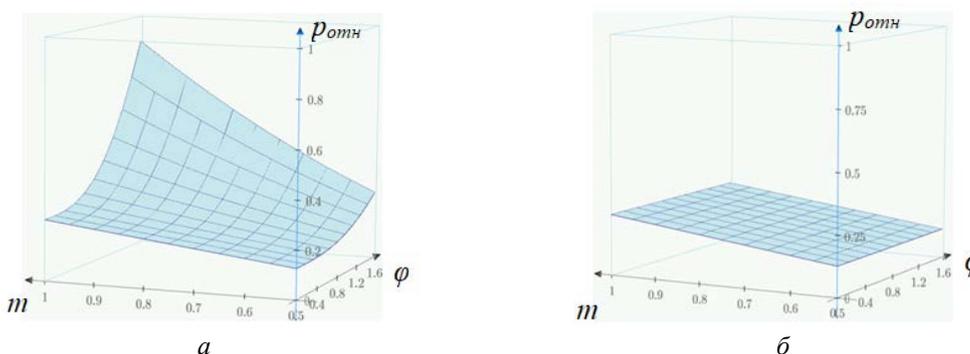


Рис. 9. Зависимости относительных потерь энергии от изменения фазового сдвига  $\varphi=0\dots\pi/2$  для нормированной амплитуды выходного напряжения  $m = 0,5\dots 1$  усилителя класса *H* (а) и усилителя класса *H* с рекуперацией реактивной энергии нагрузки (б) при относительном изменении электропитания  $\Delta\xi=0,1$ .

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

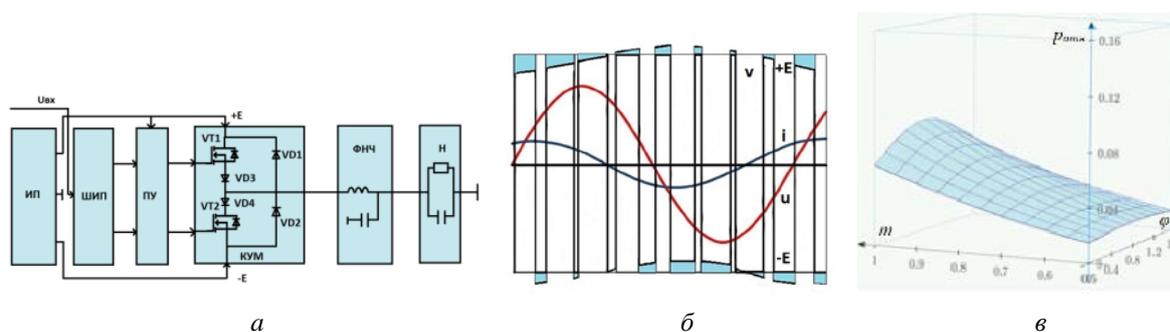


Рис. 10. Усилитель класса D (а) и временные диаграммы сигналов (б) и нормированные потери энергии  $p(\varphi, m)$  в усилителе класса D с учетом остаточных напряжений на ключевых элементах (в).

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Из диаграмм рис. 8, б, можно видеть, что процесс разряда емкостной составляющей нагрузки связан с увеличением остаточного напряжения на транзисторе ЛУМ. Таким образом, нормированные потери энергии не превышают уровня, определенного для активной нагрузки:

$$p(\varphi, m) = 4m\Delta\xi/\pi. \quad (7)$$

В рассмотренной схеме усилителя достигается минимизация мощности тепловыделения, значение которой не зависит от доли реактивной составляющей выходной мощности. Сопоставление потерь, продемонстрированное на рис. 9 подтверждает преимущество энергетических характеристик класса Н с реализацией схемы рекуперации энергии.

В настоящее время в гидроакустических передающих устройствах приоритет принадлежит ключевым усилителям [6]. Рассмотрим потери для одноканального КУМ в составе усилителя класса D (рис. 10, а). Усилительное устройство такого типа содержит источник питания (ИП), широтно-импульсный преобразователь (ШИП), предварительный усилитель (ПУ), полумостовую схему ключевого усиления (КУМ), LC фильтр нижних частот (ФНЧ) и активно-емкостную нагрузку. Временные диаграммы сигналов и нормированные потери энергии в усилителе класса D с учетом остаточных напряжений на ключевых элементах (сопротивление транзисторов  $r_T = R_{ш}/Z = 0,03$ , диодов  $r_D = R_D/Z = 0,01$ , напряжение отсечки диодов  $u_D = \frac{U_D}{E} = 0,05$ , напряжение электропитания  $E = 100$  В) представлены на рис. 11, б, в соответственно. Следует отметить, что нормированные потери энергии практически не зависят от фазового сдвига  $\varphi$ , напряжения и тока нагрузки и не превышают 0,08 для рассматриваемого случая. Сопоставление потерь энергии в усилителях класса D и в усилителях класса B, G, H, в том числе со звеньями рекуперации, подтверждает безусловное преимущество ключевых усилителей для возбуждения гидроакустических излучателей.

#### Литература

1. Догадин Н. Б. Аналого-дискретные усилители. Волгоград, СПб.: Перемена, 2003. 216 с.
2. US №8072266 Class G amplifier with improved supply rail transition control. Date of patent: Dec. 6. 2011.
3. US №8149061 B2 Class H amplifier. Date of patent. Apr.3,2011.
4. Александров В. А., Маркова Л. В. Патент №2021119720 РФ. Усилитель класса G. Заявитель и патентообладатель АО «Концерн «Океанприбор». Заявлено 05.07.2021
5. Александров В. А., Калашников С. А., Маркова Л. В. Патент №2021127183 РФ. Усилитель класса H. Заявитель и патентообладатель АО «Концерн «Океанприбор». Заявлено 14.09.2021.
6. Артым А. Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. Москва: Связь, 1980. 209 с.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ И РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КЛЮЧЕВЫХ УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ

*В. А. Александров, д-р техн. наук, Ю. В. Казаков, Л. В. Маркова, Г. С. Симонова*  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## BASIC PRINCIPLES OF IMPLEMENTATION AND CALCULATION OF STATIC LOSSES IN KEY POWER AMPLIFIERS, TAKING INTO ACCOUNT THE HIGH-FREQUENCY COMPONENTS OF THE LOSS-PASS FILTER CURRENT

*V. A. Alexandrov, Dr.Sc., Yu. V. Kazakov, L. V. Markova, G. S. Simonova*  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Показаны основные характеристики, которые необходимо учитывать при разработке ключевых усилителей мощности (КУМ). Графически представлены зависимости амплитуд и типовых потерь для усилителей класса D при работе на различные нагрузки. По результатам исследования сформулированы основные условия построения КУМ.*

*The main characteristics that must be taken into account when developing key power amplifiers (KPA) are shown. The dependences of amplitudes and heat losses for class D amplifiers are presented. Based on the results of the study, main conditions for the construction of the KPA are formulated.*

В усилителях класса D, входящих в состав гидроакустических передающих трактов (ГАПТ), энергетическая эффективность достигается импульсным преобразованием напряжения силового электропитания в напряжение возбуждения гидроакустического преобразователя (ГАП) [1, 2]. Причем для оценки энергетической эффективности устройства необходимо учитывать возникающий фазовый сдвиг между током и напряжением сигнала возбуждения ввиду емкостного характера нагрузки. Прогнозирование потерь в энергоемких узлах усилителя позволяет сделать разрабатываемое устройство более надежным.

Выбор полупроводниковых элементов осуществляется из соображений достижения требуемых технических характеристик канала ключевого усилителя мощности (КУМ) с возможностью минимизации потерь энергии для заданной номинальной выходной мощности в рабочем частотном диапазоне. Определяющими параметрами являются выбранное напряжение силового электропитания и средства согласования усилителя с нагрузкой, имеющей выраженную емкостную составляющую проводимости. Последнее обстоятельство может принципиально ограничить величину индуктивности фильтра нижних частот (ФНЧ), как неотъемлемой части усилителя низкой частоты (УНЧ).

Собственную частоту  $\Omega_0$  и добротность  $Q$  фильтра можно определить следующим образом:

$$\Omega_0 = 1/\sqrt{LC_n}; \quad Q = R_n/\sqrt{L/C_n}, \quad (1)$$

где  $L$  — индуктивность ФНЧ;  $C_n$  — емкость нагрузки, приведенная к выходу ФНЧ.

ГАП представляет сложную колебательную систему, эквивалентная схема которой содержит физическую емкость  $C_0$  и колебательный  $RLC$  контур, где  $R$  учитывает акустическую мощность излучения и мощность механических потерь [3]. При типовой добротности  $Q_k=3-5$  наблюдается значительное изменение активной  $R(\Omega)$  и емкостной  $C(\Omega)$  составляющей нагрузки. При этом в верхнем диапазоне частот доминирует емкостная проводимость  $B(\Omega)$ , значение которой в 5–10 раз превосходит активную составляющую проводимости  $G(\Omega)$ . Выделенная особенность нагрузки исключает возможность реализации ФНЧ с низкой добротностью и заставляет выбирать собственную частоту фильтра более чем в два раза выше верхней частоты рабочего диапазона. Выбор собственной частоты ФНЧ кратно выше верхней частоты усиливаемого рабочего диапазона  $\Omega_0 \geq (2 - 4) \Omega_v$  является основой реализации модулей КУМ, предназначенных для генерации сигналов возбуждения ГАП с полосой частот более октавы: при типичной добротности  $Q=5$  на частотах  $\Omega/\Omega_0 = 0,3-0,5$ , изменение напряжения амплитуды не превышает 20 %, а сдвиг фазы находится в пределах 10 градусов. С ростом относительной частоты

до 0,75 имеет место двукратное изменение напряжения и фазы сигнала, недопустимое для каналов ГАПТ. При условии того, что емкость ГАП задана, повышение собственной частоты фильтра можно добиться соответствующим уменьшением индуктивности  $L_\phi$  ФНЧ, что позволяет определить граничное условие для максимального значения  $L'_\phi$  приведенной к нагрузке:

для

$$\Omega_0 = n_\phi \Omega_B \text{Max}[L'_\phi] \leq 1/C_H(n_\phi \Omega_B)^2, \quad (2)$$

где  $\Omega_B$  — верхняя частота усиливаемого рабочего диапазона.

Выполнение этого условия влечет за собой увеличение высокочастотной составляющей выходного тока КУМ, максимальная амплитуда которого  $I_{ВМ}$  может быть соизмерима, либо превосходить максимальную амплитуду низкочастотного тока  $I_{НМ}$ . Данное обстоятельство необходимо учитывать при оценке статических потерь энергии и определении области допустимой работы полупроводниковых приборов ключевых схем усиления. Максимальный выходной ток  $I_{НМ}$  для каналов ключевого усиления, как правило, определяется исходя из минимального значения импеданса нагрузки  $Z_H(\Omega)$  в полосе рабочих частот и амплитуды импульсного напряжения  $E$  на выходе КУМ:

$$I_{НМ} = K_u^2 E / Z_H(\Omega_B) \simeq K_u^2 E C_0 \Omega_B, \quad (3)$$

где  $K_u$  — коэффициент трансформации низкочастотной составляющей выходного напряжения КУМ к нагрузке.

Для канала ключевого усилителя, при условии пропорциональной зависимости амплитуды высокочастотного тока от амплитуды импульсного напряжения:

$$I_{ВМ} = ET_0/4 L_\phi = E\pi/2\omega_0 L_\phi, \quad (4)$$

где  $T_0$  и  $\omega_0 = 2\pi/T_0$  — период и частота следования импульсов.

Тогда отношение максимальной величины высокочастотного и низкочастотного выходного тока канала  $K_{ВТ}$ :

$$K_{ВТ} = I_{ВМ}/I_{НМ} = \pi\Omega_0^2/2\omega_0 \Omega_B. \quad (5)$$

Отсюда следует, что при выполнении условия  $\Omega_0 \simeq 3\Omega_B$  для типового соотношения частоты ШИМ к верхней частоте усиливаемого сигнала  $\omega_0 = 10\Omega_B$  амплитуда ВЧ тока дросселя может в 1,5 раза превышать амплитуду тока нагрузки. Переход на новую элементную базу позволил сдвинуть граничные условия, определяющие минимальную индуктивность ФНЧ в пользу увеличения значения  $K_{ВТ}$ . При этом эквивалентное выходное напряжение КУМ в большей степени определяется сопротивлением обмотки дросселя  $R_L$ , зависящем от частоты протекаемого тока. Следует отметить, что для типичных отношений частот  $\omega_0/\Omega_B \simeq 10 \dots 20$  сопротивление обмотки дросселя для частоты  $\omega_0 \simeq 100-200$  кГц может превосходить сопротивление в полосе рабочих частот более чем в три раза. Принимая во внимание выделенное обстоятельство для наиболее часто применяемых усилителей класса АВD и ВD, целесообразно определить потери энергии с учетом высокочастотных составляющих тока дросселя. Функциональные схемы таких усилительных устройств с разнотипными оконечными каскадами, выполненными на карбид-кремниевых транзисторах фирмы «СRЕЕ», приведены на рис. 1. Наиболее простым образом реализуется одноканальный усилитель класса АВD (рис. 1, а), в состав которого входят: одноканальный широтно-импульсный модулятор (ШИП), полумостовая схема ключевого усилителя мощности (КУМ), емкостной фильтр по питанию (ФП), LC фильтр нижних частот (ФНЧ), согласующий выходной трансформатор (СУ), подключенный к комплексной нагрузке  $Z_H$  (Н). Усилитель ВD содержит двухканальный ШИМ и двухканальный КУМ. Согласование такого усилительного устройства с нагрузкой может осуществляться через согласующий трансформатор, включенный непосредственно в диагональ мостовой схемы КУМ через дроссели ФНЧ (рис. 1, б).

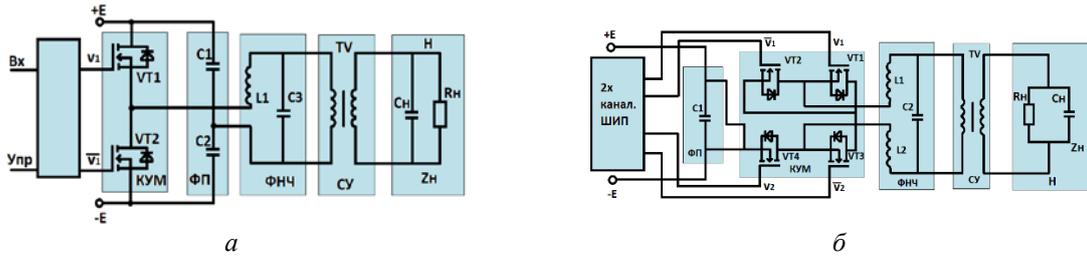


Рис. 1. Функциональные схемы ключевых усилителей мощности с одноканальным (а), двухканальным (б) мостовым оконечными каскадами. Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

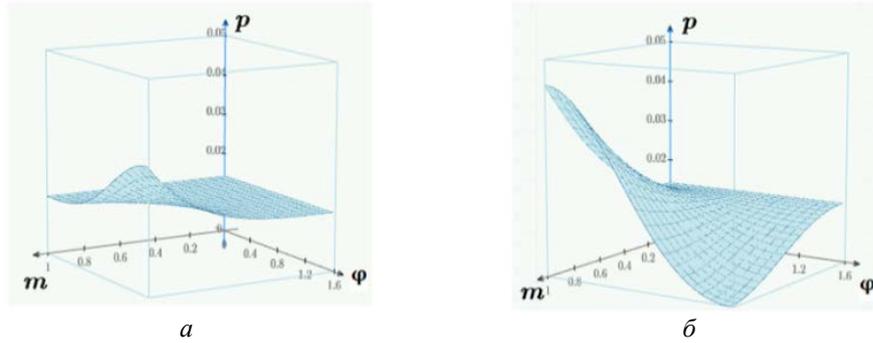


Рис. 2. Зависимость величины статических потерь  $p$  в одноканальном усилителе класса ABD от относительной амплитуды  $m$  и текущей фазы  $\varphi$ .

$a$  — для фазового сдвига тока и напряжения нагрузки при  $\varphi = 0$ ;  $b$  — при  $\varphi = \pi/2$ . Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

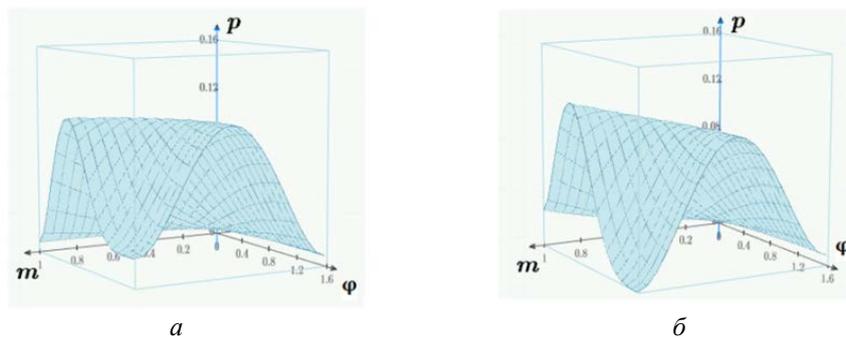


Рис. 3. Зависимость величины статических потерь  $p$  в усилителях класса BD от относительной амплитуды  $m$  и текущей  $\varphi$ .

$a$  — при  $\varphi = 0$ ;  $b$  — при  $\varphi = \pi/2$ . Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

При проектировании усилительного устройства класса ABD необходимо учитывать, что суммарное значение НЧ и ВЧ тока приводит к значительному увеличению максимальной амплитуды тока дросселя:

$$\text{Max}[i_{LM}] = i'_{HM} + i'_{VM} = E(\pi/2\omega_0 L_{\text{фop}} + 1/Z'_{H \text{ min}}) = i'_{HM}(1 + K_{\text{BT}}), \quad (6)$$

где  $i'_{HM}$  и  $Z'_{H \text{ min}}$  — максимальный ток и минимальный импеданс нагрузки, приведенные к выходу КУМ, причем:

$$i'_{HM} = i_{HM} K_u, \quad Z'_{H \text{ min}} = Z_{H \text{ min}} / K_u^2.$$

Статические потери  $p(m, x)$  в зависимости от относительной амплитуды гармонического входного сигнала  $m$  и текущей фазы  $x = \Omega t$  для фазового сдвига тока и напряжения  $\varphi_n$  могут быть определены соотношением:

$$p(m, x) = 2m^2(r_T + r_L)(\sin(\varphi + x))^2 + K_T^2(2r_T/3 + K_{LT}r_L/4) \times (1 - m^2 \sin^2 x)^2, \quad (8)$$

где  $r_T = R_T/Z_n$ ,  $r_L = R_L/Z_n$  — относительные значения собственных сопротивлений транзисторов и обмоток дросселя;  $K_{LT} \approx 3,0$  — коэффициент увеличения сопротивления обмотки на частоте переключений.

Графики статических потерь энергии для относительных величин  $r_T = r_L = 0,005$  при работе на активную ( $\varphi = 0$ ) и емкостную ( $\varphi = \pi/2$ ) нагрузку иллюстрируются на рис. 2, а, б. Из расчетов следует, что при работе на комплексную нагрузку максимальное значение потерь энергии практически вдвое превышает потери в случае работы на активную нагрузку. Двухканальный усилитель класса ВD отличается от усилителя класса АВD по двум значимым параметрам. Во-первых, в таком усилительном устройстве достигается двукратное повышение суммарной частоты переключений  $\omega$  по сравнению с частотой переключений отдельных каналов  $\omega_0 = 0,5\omega$ . Во-вторых, наибольшая амплитуда высокочастотного тока достигается при относительном уровне модулирующего сигнала  $m = 0,5$ , что существенно уменьшает влияние ВЧ составляющих тока дросселя на статические потери энергии. Причем для схемы усиления ВD максимальная амплитуда высокочастотного тока дросселя совпадает с половинным уровнем низкочастотного тока, что уменьшает их максимальное значение:

$$\text{Max}[i_{Lm}] = 0,5i_{нм} + i_{вм} = E(\pi/2\omega L_\phi + 1/2Z_{н\text{min}}). \quad (8)$$

Выделенные преимущества значительно влияют в схеме усиления ВD на максимальное значение потерь энергии  $p(m, x)$ , величина которых может быть определена следующим образом:

$$p(m, \varphi) = 0,01(1,1m^2 \sin(\varphi + x) + 0,02 \gamma^2 m^2 \sin(\varphi + x) (\sin x - m(\sin x)^2)(1 - 2m \sin x + 1,36\gamma^2 m^2 (\sin x - m(m \sin x)^2)^2), \quad (9)$$

где  $\gamma = I_{вн}/I_{нм}$ .

Анализ рассчитанных зависимостей, приведенных на рис. 3 показывает, что в усилителе класса ВD с двухканальной ШИМ статические потери энергии при активной и емкостной нагрузке имеют различный характер, но не превышают равных максимальных значений.

Таким образом, можно подытожить проведенные исследования:

- собственная частота фильтра должна быть более чем в 2–3 раза выше верхней частоты рабочего диапазона;
- частота переключений усилителя должна учитывать граничные значения индуктивности фильтра, определенные емкостью нагрузки и допустимой амплитудой высокочастотного тока дросселя фильтра;
- канальное наращивание мощности модуля КУМ обеспечивается совместно с внедрением многоканальной ШИМ, позволяющейкратно увеличить результирующую частоту.

Указанные принципы являются необходимыми для построения энергетически эффективных каналов усиления сигналов возбуждения ГАП.

#### **Литература**

1. Артым А. Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. М.: Связь, 1980. 209 с.
2. Александров В. А., Майоров В. А., Калашников С. А., Казаков Ю. В. Передающие тракты низкочастотной гидролокации // Морская радиоэлектроника. 2019. Вып 1(67). С. 10–16.
3. Александров В. А., Майоров В. А., Маркова Л. В. Модули силовой электроники передающих трактов гидроакустических комплексов // Морская радиоэлектроника. 2018. Вып 2(64).

## ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДЕ

Ю. А. Ломовацкий

ФГУП «ВНИИФТРИ», п. Менделеево, Московская область, Россия

## HIGH-PRECISION SOUND VELOCITY PROFILERS

Y. A. Lomovackiy

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow Region, Russia

*В статье приведены и рассмотрены конструкторские решения и принципы построения созданного во ВНИИФТРИ Государственного первичного эталона единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012 и рабочего эталона единицы скорости звука в водной среде. Рассмотрены проблемы, возникшие при его эксплуатации и способы решения данных проблем. Проведен анализ состояния и перспективы развития в области обеспечения единства измерений скорости звука в водной среде.*

*The article presents and discusses design solutions and principles of construction of the State Primary Standard of the Unit of Sound Velocity in Liquid media of GET 201-2012 created at VNIIFTRI and the working standard of the unit of sound velocity in an aqueous medium. The problems that arose during its operation and ways to solve these problems are considered. The analysis of the state and prospects of development in the field of ensuring the uniformity of sound velocity measurements in the aquatic environment is carried out.*

Скорость распространения звука является фундаментальным параметром, определяющим структуру акустического поля в естественных акваториях, в исследовательских и технологических установках. С целью обеспечения единства и повышения уровня метрологического обеспечения измерений скорости звука в воде во ФГУП «ВНИИФТРИ» проводятся работы по созданию и совершенствованию эталонной базы данного вида измерений. Разработан нормативный документ ГОСТ Р 8.870-2014 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений скорости звука в жидких средах в диапазоне от 800 до 2000 м/с. Возглавляет схему государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012, разработанный и эксплуатируемый во ФГУП «ВНИИФТРИ» [2].

Основным элементом ГЭТ при воспроизведении единицы скорости звука и передачи ее размера подчиненным средствам измерений скорости звука является эталонный измерительный преобразователь скорости звука — ЭИПСЗ [3]. В ЭИПСЗ реализован времяпролетный импульсный метод измерения скорости звука. Он обеспечивает измерение скорости звука абсолютно, инвариантен к свойствам жидкости, малогабаритен. Имеет в качестве акустической базы калиброванную призму, четыре пьезоизлучателя, юстировочное устройство. ЭИПСЗ требует тщательной юстировки и настройки, которая может быть нарушена при транспортировании. ЭИПСЗ обеспечивает воспроизведение единицы с СКО=0,005 м/с и НСП=0,04 м/с. Основные элементы и принцип действия ЭИПСЗ показаны на рис. 1.

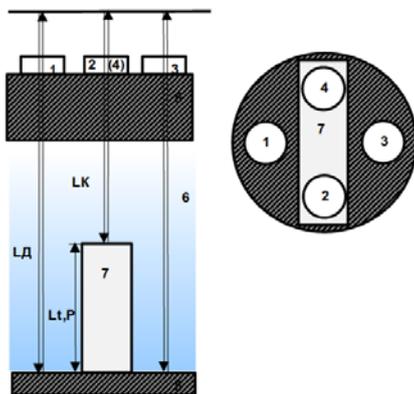


Рис. 1. Основные элементы и принцип действия ЭИПСЗ.

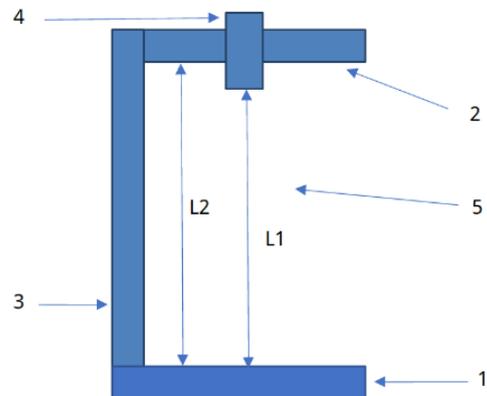


Рис. 2. Основные элементы и принцип действия измерительной базы.

При измерениях на пьезопреобразователи 1...4 последовательно подают запускающий электрический импульс. Этот импульс преобразуется в пьезопреобразователе в ультразвуковой сигнал частотой  $\sim 5$  МГц, проходящий через толстую плоскопараллельную пластину 5 в рабочую жидкость 6, в которой измеряют скорость звука. Два ультразвуковых сигнала отражаются от торца плоскопараллельной призмы 7 (короткие пути), а два — от звукоотражающей пластины 8 (длинные пути). Отраженные ультразвуковые сигналы возвращаются к пьезопреобразователям 1...4. Призма 7 образует измерительную базу  $L_{t,p}$ . Применение толстой плоскопараллельной пластины 5 позволяет проявить на осциллограмме картину многократных отражений ультразвукового сигнала, исключить все временные задержки и выделить из измеряемых интервалов чистое время  $\tau$  прохождения ультразвукового сигнала в жидкости.

Скорость звука в жидкости вычисляют по формуле:

$$C = 2 L_{t,p} / \tau, \quad (1)$$

Длина базы измерения в зависимости от измеренных температуры  $t$  и давления  $P$  рассчитываются по известной зависимости:

$$L_{t,p} = L_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)] \cdot [1 - (1 - 2 \cdot \mu) \cdot P/E], \quad (2)$$

где  $L_0$  — значение длины базы, определенное при ее поверке при определенной температуре  $t_0$  и атмосферном давлении;  $\alpha$  — тепловой коэффициент линейного расширения материала базы;  $P$  — избыточное давление,  $\mu$  — коэффициент поперечной деформации материала базы;  $E$  — модуль упругости материала базы.

В основе любого времяпролетного способа определения скорости звука, лежит необходимость предельно точного измерения длины базы  $L_{t,p}$  и времени  $\tau$  ее прохождения звуковыми импульсами. Эти величины являются главными источниками погрешности в определении скорости звука. Применение осциллографа LeCroy WP725Zi обеспечило погрешность измерения интервала времени  $\Delta t = 0,4$  нс, чему соответствует погрешность в определении скорости звука  $\Delta C = 0,02$  м/с. По длине база измерялась в ФБУ «Ростест-Москва» с погрешностью 0,3 мкм, обеспечившей погрешность в определении скорости звука  $\Delta C = 0,015$  м/с. За время эксплуатации ЭИПСЗ выявились некоторые недостатки. Проявилось наличие источника неконтролируемой погрешности при определении длины базы измерения  $L_{t,p}$ , вызванного тем, что база в виде параллелепипеда 7 закреплена одним торцом на основании механическим способом с помощью винта и пружины. Такое крепление не обеспечивает плотного контакта торца параллелепипеда с основанием. Точно определить образующийся при этом зазор не представляется возможным, но из вышесказанного следует, что вызванная им погрешность определения скорости звука может быть существенна. Проявились недостатки применения плоскопараллельной пластины в качестве дополнительного отражателя и четырех приемо-передающих пьезопреобразователей. Это приводит к появлению на пути распространения звуковых импульсов четырех звукоотражателей и, как следствие этого, двух отраженных от плоскостей пластины звуковых импульсов на входе каждого пьезопреобразователя. В связи с этим определение времени  $\tau$  прохождения звуковыми импульсами базы измерения  $L_{t,p}$  носит более сложный характер, чем в случае, когда время  $\tau$  равно разности времен прихода звуковых импульсов, отраженных от границ базы измерения.

Не эффективным оказалось применение юстировочного устройства (на рисунке не показано). На практике измерения проводятся в нескольких выбранных точках заданного диапазона температур и давлений. Юстировка, проведенная при одних значениях температуры  $t$ , иногда не сохраняется при других значениях  $t$ . Проведение юстировки перед каждым измерением делает работу крайне сложной и трудоемкой. Кроме того, невозможно проводить юстировку при избыточных давлениях, так как устройство при этом находится в герметично закрытой камере давления и недоступно. Погрешность недоюстировки при избыточных давлениях становится неконтролируемой. В рамках работ, проводимых в настоящее время в ФГУП «ВНИИФТРИ», разработана измерительная база, основные элементы и принцип действия которой показан на рис. 2.

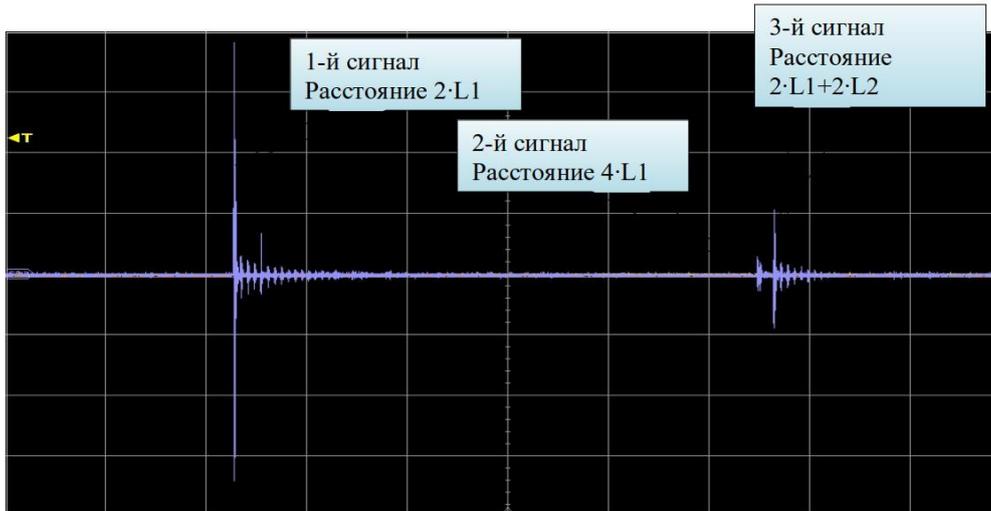


Рис. 3. Осциллограмма, поясняющая принцип действия базы.

База содержит два звукоотражателя 1, 2. Звукоотражатель 1 служит основанием. Звукоотражатели жестко установлены параллельно друг другу на расстоянии  $L_{т,р}$  с помощью вертикальной стойки 3. На звукоотражателе 2 установлен приемопередающий пьезопреобразователь 4 таким образом, что его излучающая поверхность выступает под отражающей поверхностью звукоотражателя 2 более, чем на длину звукового импульса. Между звукоотражателями 1 и 2 находится зона измерения 5 скорости звука в воде.

При заданных температуре и давлении с помощью приемопередающего пьезопреобразователя 4 звуковые импульсы направляют на звукоотражатели 1 и 2. По времени прохода отраженными импульсами базы измерений  $L_{т,р}$  судят о скорости звука в жидкой среде. При этом фиксируют интервал времени  $\tau_1$  от начала формирования звуковых импульсов до момента приема звуковых импульсов, отраженных от звукоотражателя 1, интервал времени  $\tau_2$  от начала формирования звуковых импульсов до момента приема звуковых импульсов, последовательно отраженных от звукоотражателей 1, 2, 1. На рис. 3 показана осциллограмма, поясняющая принцип действия базы. При измерениях на пьезопреобразователь 4 подается импульс, который преобразуется в ультразвуковой сигнал. Этот сигнал, пройдя путь  $2L_1$  от пьезопреобразователя 4 до звукоотражателя 1 и обратно, проявляется на осциллограмме как 1-й сигнал с интервалом  $\tau_1$ . Далее сигнал, отраженный от пьезопреобразователя 4 до звукоотражателя 1 и часть его, вернувшаяся в пьезопреобразователь 4 и прошедшая путь  $4L_1$ , проявляется на осциллограмме как 2-й сигнал. Другая часть сигнала доходит до звукоотражателя 2, обратно до звукоотражателя 1 и возвращается к пьезопреобразователю 4, пройдя путь  $2L_1 + 2L_2$ . Она проявляется на осциллограмме как 3-й сигнал с интервалом  $\tau_2$ . Скорость звука  $C$  определяют из математического выражения:

$$C = \frac{2L_{т,р}}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (3)$$

Из рис. 2 видно, что  $2L_2$  — это удвоенное расстояние между отражающими поверхностями, проходимое сигналом в жидкой среде. Это расстояние получаем, вычитая из расстояния 3-го сигнала расстояние 1-го сигнала:

$$2L_{т,р} = (2L_1 + 2L_2) - 2L_1 = 2L_2, \quad (4)$$

Соответствующее этому расстоянию время прохождения сигнала в жидкой среде находим:

$$\tau = \tau_2 - \tau_1, \quad (5)$$

Предложенная конструкция базы позволяет проявить на осциллограмме картину

многократных отражений ультразвукового сигнала. При этом выделить из измеряемых интервалов время прохождения ультразвуковым сигналом расстояния между отражающими поверхностями и исключить отражения между преобразователем и отражающей поверхностью, которые не поддаются определению. Для этого пьезопреобразователь установлен таким образом, что его излучающая поверхность выступает под отражающей поверхностью звукоотражателя более, чем на длину звукового импульса.

Жёсткая конструкция базы, выполненная из заготовки за один установ, обеспечивает плоскопараллельность звукоотражателей уже на стадии изготовления и исключает необходимость юстировки устройства при его эксплуатации.

Предложенная конструкция позволяет с большой точностью определить значение длины базы измерения  $L_0$  при использовании современных эталонных средств измерения длины. В конструкции отсутствуют источники неконтролируемых погрешностей, связанные с механическим способом установки измерительной базы, отсутствует необходимость юстировки звукоотражателей. Устранен источник неконтролируемой погрешности при определении величины базы измерения  $L_{г.р.}$ . Оптимизированы конструктивное решение и эксплуатационные качества измерительной базы.

#### *Литература*

1. ГОСТ Р 8.870-2014 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений скорости звука в жидких средах в диапазоне от 800 до 2000 м/с.
2. Белогольский В. А., Саморукова Л. М., Сильвестров С. В. Государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах. Метрология гидроакустических измерений // Мат. Всерос. науч.-техн. конф. Менделеево. 2013.
3. Белогольский В. А., Саморукова Л. М., Сильвестров С. В. Патент на изобретение № 2529734. Времяпролетный способ определения скорости звука в жидкой среде и устройство для его осуществления. Патентообладатель ФГУП "ВНИИФТРИ". – Приоритет изобретения 17 мая 2013г. – Бюлл. № 27 от 27.09.2014г.
4. Александров А. А., Ларкин Д. К. Экспериментальное определение скорости звука в воде в широком диапазоне температур и давлений // Теплоэнергетика. 1976. № 2. С.75–78.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ IN SITU СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В МОРСКОЙ ВОДЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ЗОНДОМ ТИПА «ОЛД-1» И ИЗМЕРИТЕЛЕМ СКОРОСТИ ЗВУКА MINISVP ФИРМЫ VALEPORT

А. Ф. Мирончук, канд. техн. наук, К. А. Румянцев, А. С. Светличный  
АО «Морские неакустические комплексы и системы», Санкт-Петербург, Россия

## ANALYSIS RESULTS OF DIRECT AND INDIRECT IN SITU MEASUREMENTS OF SOUND SPEED IN SEAWATER DONE WITH HYDROLOGICAL PROBE OF TYPE «OLD-1» AND SOUND VELOCITY PROFILER MINISVP BY VALEPORT

A. F. Mironchuk, Ph.D., K. A. Rumyantsev, A. S. Svetlichny  
JSC «Marine Non-acoustic Complexes and Systems», St. Petersburg, Russia

*Представлены результаты сравнительного анализа профилей скорости звука, полученных в ходе вертикального зондирования измерителем скорости звука (ИСЗ) miniSVP® фирмы «Valeport» и гидрологическим (электрическая проводимость, температура, давление, скорость звука) зондом типа «ОЛД-1», разработанным группой компаний «НАЕСО». Подтверждена сопоставимость метрологических характеристик зонда типа ОЛД-1 и ИСЗ в рабочих условиях. Приведены результаты сравнения синхронных прямых и косвенных измерений скорости звука, выполненных зондом типа «ОЛД-1». Показаны преимущества наличия канала прямых измерений скорости звука в составе зонда «ОЛД-1».*

*The results of a comparative analysis of sound velocity profiles obtained by different instruments are presented. Data obtained by sound velocity profiler (SVP) miniSVP® by Valeport and hydrological probe (conductivity, temperature, pressure and sound velocity) «OLD-1» engineered by «NAECO» group. Comparable metrological performance of both devices confirmed in field measurements. Comparison of simultaneous direct and indirect sound velocity measurements done by «OLD-1» probe shows the advantage of introduced direct measurement channel.*

**Методы измерения скорости звука.** Измерения скорости звука в морской воде могут выполняться прямым и косвенным методами. Прямой метод измерений скорости звука метрологически обеспечен государственной поверочной схемой для средств измерений скорости звука в жидких средах [1]. Поверочной схемой предполагается наличие рабочих средств измерений (прямым методом) с погрешностью 0,1...0,6 м/с. Погрешность рабочего эталона 1-го разряда составляет  $\pm(0,25...0,5)$  м/с и  $\pm(0,4...0,8)$  м/с для эталона 2-го разряда. Из этого следует, что при синхронном зондировании в морской среде двумя средствами измерений, с погрешностями рабочих эталонов 1-го разряда ожидаемая разность результатов измерений может находиться в пределах  $\pm 1$  м/с.

Косвенный метод измерений скорости звука в морской воде базируется на международном уравнении состояния морской воды [2], последняя редакция которого TEOS-10 принята МОК ЮНЕСКО (IOC UNESCO) в июне 2009 г.

Погрешность вычислений скорости звука в соответствии с данным уравнением по результатам прямых измерений температуры, давления и солености (электрической проводимости) находится в пределах  $\pm 0,05$  м/с. Прямые измерения температуры, давления, солености и электрической проводимости метрологически обеспечены государственными поверочными схемами для средств измерений температуры [3], давления [4], электрической проводимости [5] Шкалой практической солености [6], таблицами стандартных справочных данных [7] и справочными данными по скорости звука в морской воде [8].

Принимая во внимание то, что погрешность рабочих средств измерений температуры, давления и электрической проводимости находятся в пределах (0,02...0,05) %, с учетом измерений в динамическом режиме и различии во временных и пространственных масштабах осреднения датчиков можно предположить, что именно эти погрешности (а не погрешность уравнений, рекомендованных TEOS-10) и определит результирующую погрешность рассчитанных значений скорости звука.

**Сравнительный анализ результатов измерений.** Так как практика — критерий истины, рассмотрим результаты трех (из аналогичных двухсот) вертикальных зондирований, выполненных в различных точках Мирового океана с помощью ИСЗ miniSVP [9] и зонда типа «ОЛД-1» [10], производства группы компаний «NAESCO». Общий вид зондов показан на рис. 1. ИСЗ miniSVP выполнял прямые измерения скорости звука, паспортное значение погрешности измерений  $\pm 0,25$  м/с. Зонд типа «ОЛД-1» помимо измерительных каналов температуры, электрической проводимости и давления был дооснащен измерительным каналом скорости распространения звука в воде (ИКСЗ) (датчик двухбазовый с масштабом осреднения 65 мм.), канал скорости звука откалиброван по значениям скорости звука в дистиллированной воде. Зондирования выполнялись обоими зондами на трёх станциях с интервалом времени не более двух часов. Результаты прямых измерений (профиль скорости звука, разность показаний приборов и ее среднеквадратическое отклонение (СКО) приведены на рис. 2–4.



Рис. 1. Гидрологический зонд типа «ОЛД-1» и измеритель скорости звука miniSVP.

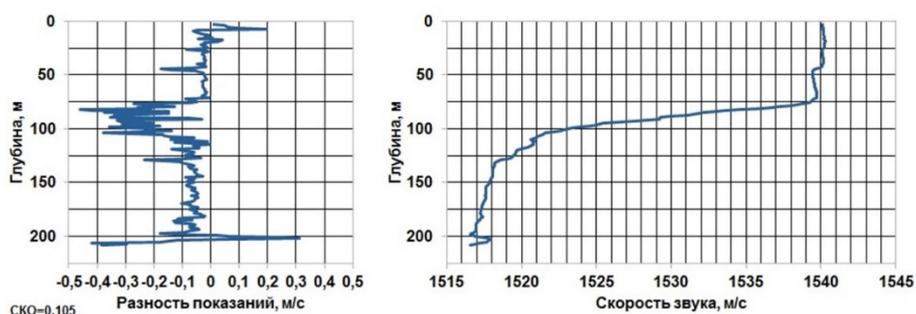


Рис. 2. Результаты прямых измерений скорости звука на станции № 1 и разность показаний двух зондов; СКО=0,105.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

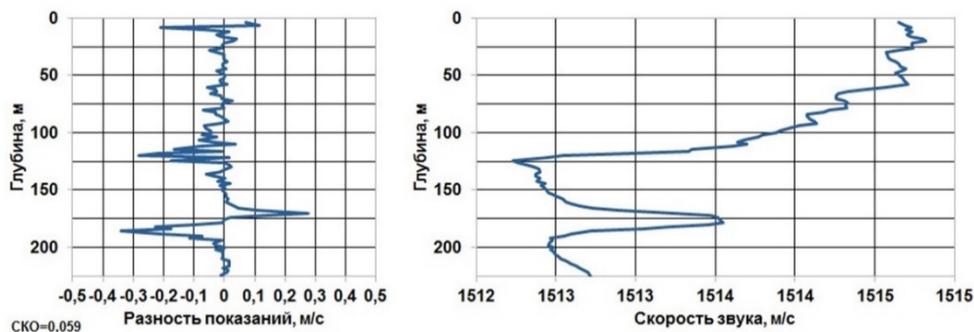


Рис. 3. Результаты прямых измерений скорости звука на станции № 2 и разность показаний двух зондов; СКО=0,059.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

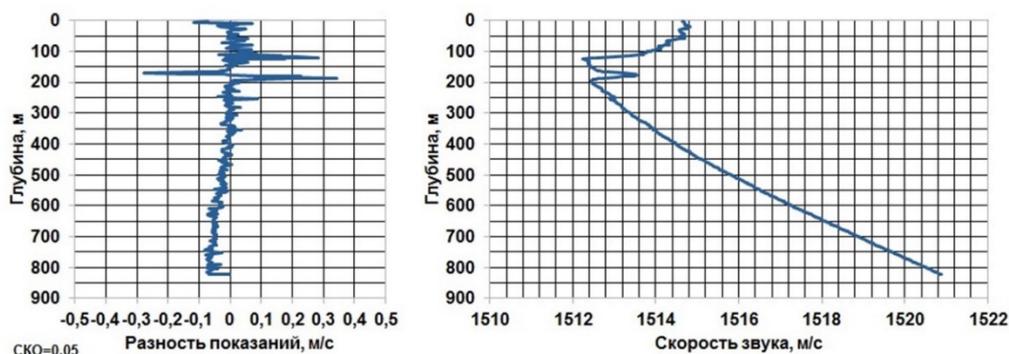


Рис. 4. Результаты прямых измерений скорости звука на станции № 3 и разность показаний двух зондов; СКО=0,05.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

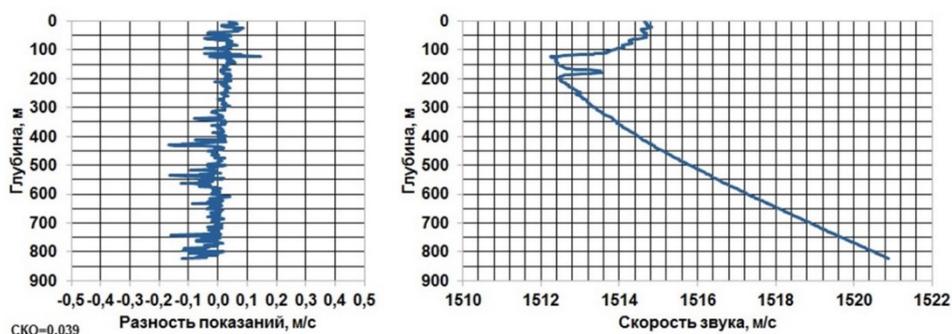


Рис. 5. Результаты измерений скорости звука на станции № 3 и разности прямых и косвенных измерений, выполненных зондом типа «ОЛД-1»; СКО=0,039.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Анализ результатов зондирований, приведенных на рис. 2–4 свидетельствует о том, что в слоях с малыми градиентами поля скорости звука расхождение результатов прямых измерений, выполненных ИСЗ miniSVP и зондом типа «ОЛД-1» не превышает  $\pm 0,25$  м/с. Большие значения разностей приходятся на участки с высокими градиентами поля скорости звука. На рис. 5 приведены разности профилей скорости звука, построенные по результатам синхронных прямых и косвенных измерений, выполненных зондом типа «ОЛД-1» на станции № 3. Анализ разностей, приведенных на рис. 5 свидетельствует о том, что в слоях с малыми градиентами поля скорости звука расхождение результатов прямых и косвенных измерений, выполненных зондом типа «ОЛД-1» не превышает  $\pm 0,2$  м/с. Большие значения разностей так же приходятся на участки с высокими градиентами. Среднее квадратическое отклонение по всему диапазону равно 0,039 м/с.

Таким образом результаты измерений (в рабочих условиях применения!) скорости звука зондом типа «ОЛД-1» полученные как прямым, так и косвенным методом, совпадают с результатами измерений ИСЗ miniSVP в пределах  $\pm 0,25$  м/с, что в несколько раз меньше теоретически ожидаемой ( $\pm 1$  м/с.). Высокое совпадение результатов прямых и косвенных измерений скорости звука, выполненных зондом типа «ОЛД-1» с ИСЗ, откалиброванным в дистиллированной воде по таблицам [7] и остальными каналами по ШПС–1978 [6], показывает практическую равноценность этих методик калибровки при их независимости. Это также может быть использовано для автоматического контроля метрологической исправности зонда. Расхождение результатов прямых и косвенных измерений скорости звука на нормированную величину может быть критерием метрологической неисправности и необходимости проведения калибровки. Таким образом для зонда типа «ОЛД-1» появляется возможность самопроверки с отказом от обязательной периодической поверки и переходом к выполнению калибровки — при необходимости.

**Выводы.** 1. В рабочих условиях применения (при изменении температуры, гидростатического давления и солености):

- а) вертикальные профили скорости звука, построенные по результатам прямых измерений зондом типа «ОЛД-1» и ИСЗ miniSVP совпадают в пределах  $\pm 0,25$  м/с;

б) вертикальные профили поля скорости звука, построенные по результатам синхронных прямых и косвенных измерений зондом типа «ОЛД-1» совпадают в пределах  $\pm 0,2$  м/с.

2. Подтверждена возможность использования зонда типа «ОЛД-1» в целях импортозамещения средств измерений скорости распространения звука в воде зарубежного производства.

3. Полученные результаты подтверждают, что использованные в зонде ОЛД-1 технические решения в части ИКСЗ и предложенная методика его калибровки с применением только дистиллированной воды позволяют обеспечить метрологические характеристики измерительного канала во всём диапазоне измерений скорости распространения звука в Мировом океане - от 1402 до 1560 м/с. Данное обстоятельство позволяет существенно упростить процедуры калибровки и поверки ИКСЗ, а также снизить их трудоёмкость и стоимость за счёт исключения необходимости использования стандартной морской воды и солемеров как зарубежного, так и отечественного производства.

4. Предложен критерий контроля метрологической исправности гидрологического зонда.

#### *Литература*

1. ГОСТ Р 8.870-2014 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений скорости звука в жидких средах в диапазоне от 800 до 2000 м/с. М.: Стандартинформ, 2014.

2. Feistel R. A Gibbs function for seawater thermodynamics for  $-6$  to  $80^\circ\text{C}$  and salinity up to  $120\text{gkg}^{-1}$ /Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2008. Vol. 55, № 12. P. 1639–1671.

3. ГОСТ 8.558-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерения температуры. – Москва: Стандартинформ, 2009.

4. ГОСТ Р 8.802-2012 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений избыточного давления до 250 МПа. М.: Стандартинформ, 2014.

5. ГОСТ 8.457-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений удельной электрической проводимости жидкостей. М.: Стандартинформ, 2016.

6. Государственная служба стандартных справочных данных. Таблицы стандартных справочных данных. Морская вода. Шкала практической солености 1978 г. 1978.

7. Государственная служба стандартных справочных данных. Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Скорость звука при температурах  $0,100$  °С и давлениях  $0,101325,100$  МПа. ГСССД 190-2000. М. 2000.

8. Государственная служба стандартных справочных данных. ГСССД 202-2002 Морская вода. Скорость звука при соленостях  $0...40$  промилле, температурах  $0...40$  °С и избыточных давлениях  $0...60$  МПа. М. 2002.

9. miniSVP – Sound Velocity Profiler. - URL: <https://www.valeport.co.uk/products/minisvp-sound-velocity-profiler/>.

10. Автономный гидрологический зонд. - URL: [https://naeco.ru/measurement\\_equipment/aquast-ctd-old1/](https://naeco.ru/measurement_equipment/aquast-ctd-old1/).

## РАЗРАБОТКА АТЛАСА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

К. П. Львов, М. А. Науменко<sup>1</sup>, д-р геогр. наук  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1</sup>ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

## DEVELOPMENT OF ATLAS OF VERTICAL DISTRIBUTION OF SOUND VELOCITY OF LAKE LADOGA

K. P. Lvov, M. A. Naumenko<sup>1</sup>, Dr.Sc.  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia  
<sup>1</sup>Institute of Limnology of RAS - St. Petersburg Federal Research Center of RAS, Russia

*Представлены подходы к разработке электронного атласа расчетных значений скорости звука основанные на постоянстве минерализации и районировании озера на лимнические районы I, II, ..., VI института озероведения РАН. Средняя минерализация основной водной массы Ладожского озера составляет  $\approx 0.064$  г/кг (2019 г.). Для расчета скорости звука использовались данные климатических (среднемноголетних) натурных наблюдений за температурой воды как функции глубины всех лимнических зон. Вычисления произведены по упрощенной формуле Чена и Миллера (1986) для озерных вод. Пользователь атласа может воспользоваться в операционной системе WINDOWS приложением с графическим интерфейсом GUI в среде МАТЛАБа. Для иллюстрации работы с атласом приведены примеры.*

*Approaches of Institute of Limnology of RAS to the development of an electronic atlas of sound velocity are presented based on constancy of a mineralization and division into districts of Lake Ladoga on the limnic regions I, II, ..., VI. The average mineralization of the main water mass of Lake Ladoga is  $\approx 0.064$  g/kg (2019). For calculation of sound velocity data of climatic (mean annual) water temperature field monitoring as functions of depth of all limnic region were used. Calculations are made using simplified Chen & Millero's formula (1986) for lake waters. In operating system the user of the atlas can use Windows application with the graphic interface GUI in the environment of MATLAB. Examples are given for an illustration of work with the atlas.*

Знание вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) требуется для обеспечения испытаний на ладожском полигоне АО «Океанприбор» гидроакустических средств: гидролокаторов, эхолотов, лагов, систем связи, навигации, телеметрии и др. Существуют прямые методы измерения скорости звука с помощью гидроакустических измерителей (ГИСЗ) нескольких разновидностей. Косвенные методы оценивания скорости звука основаны на расчетах. Известны формулы для морской воды (sea waters), которые осуществляют расчет скорости звука для заданных значений температуры, солености и гидростатического давления [1–3]. Наиболее характерной особенностью ладожской воды является слабая минерализация. Средняя минерализация основной водной массы Ладожского озера составляет  $\approx 0,064$  г/кг (2019 г), что ниже минерализации водной массы Байкала 0.096 г/кг. Основная водная масса озера обладает малой пространственной и временной изменчивостью минерализации. Наибольшие значения средней температуры верхнего слоя воды достигают в начале августа  $\approx 16^\circ\text{C}$ . На глубине — холодная 4-градусная вода, т.н. 4-градусная изотерма, максимум плотности пресной воды. Основной объем водной озерной массы остается холодным даже в летний период. Институтом озероведения (ИНОЗ) РАН произведено районирование по глубине на лимнические зоны I–VI. Зоны I–V с глубинами соответственно 0–18, 18–50, 50–70, 70–100 и 100–140 м. Зона VI с глубинами 140–230 м расположена восточнее выхода из зал. Найсмери полигона, юго-восточнее м. Куркиниemi [1, 3, 8]. В изданиях ИНОЗ РАН можно найти массу сведений и ссылок о данных натурных наблюдений температуры, описание лимнических зон и различные графики температуры воды [4, 5, 8]. Чен и Миллеро в 1986 г. опубликовали формулу расчета скорости звука для озерных вод (lake waters):

$$c = 1402.39 + 5.04 * T - 5.81 * 10^{-2} * T^2 + 3.34 * 10^{-4} * T^3 - 1.48 * 10^{-6} * T^4 + 3.15 * 10^{-9} * T^5 + (1.32 - 7.01 * 10^{-3} * T + 4.9 * 10^{-5} * T^2) * S + (1.32 - 7.01 * 10^{-3} * T + 4.9 * 10^{-5} * T^2) * S + (0.16 + 4.05 * 10^{-4} * T - 8.15 * 10^{-7} * T^2 - 5.58 * 10^{-5} * S) * P + 1.59 * 10^{-5} * P^2,$$

где  $c$  — скорость звука, м/с;  $T$  — температура, °С;  $P$  — давление, бар;  $S$  — минерализация (соленость), г/кг. Контрольные значения (Check values) скорости звука следующие. При  $S=0$  г/кг;  $t = 10$  °С;  $P = 100$  bars значение скорости 1463,390 м/с. При  $S = 0,5$  г/кг;  $t = 10$  °С;  $P=100$  bars значение скорости 1464,016 м/с [6].

Упрощая формулу Чена и Миллера для озерных вод за счет членов содержащих температуру в степени выше три с множителями менее чем  $10^{-4}$ , учитывая среднюю минерализацию основной водной массы Ладожского озера  $\approx 0.064$  г/кг и максимальное давление  $\approx 20$  бар, в инженерном приближении получаем

$$c(T, z) = 1402.3 + 5.04T - 0.058T^2 + 3.34 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 0.016z,$$

где  $c(T, z)$  — скорость звука, м/с;  $T$  — температура, °С;  $z$  — глубина, м.

В табл. 1 приведены для сравнения примеры расчетных значений скорости звука. Значения величин, входящих в формулы Чена и Миллера (1977 г., [7]), (1986 г., [6]) и упрощенной, соответствуют условиям Ладожского озера.

Таблица 1

Примеры расчетных значений скорости звука

| $z$ , м | $T$ , °С | 1977, м/с | 1986, м/с | Упрощённая, м/с |
|---------|----------|-----------|-----------|-----------------|
| 5       | 10       | 1447.432  | 1447.430  | 1447.362        |
| 10      | 8        | 1439.375  | 1439.373  | 1439.295        |
| 15      | 6        | 1430.912  | 1430.911  | 1430.827        |
| 5       | 12       | 1455.178  | 1455.176  | 1455.124        |
| 10      | 10       | 1447.513  | 1447.511  | 1447.441        |
| 15      | 8        | 1439.455  | 1439.454  | 1439.373        |
| 30      | 4        | 1422.187  | 1422.187  | 1422.100        |

Для расчета скорости звука в атласе используются данные годовых климатических (среднегодовых) натуральных наблюдений за температурой воды по глубине ИНОЗ РАН для всех лимнических зон. Пример фрагмента набора данных (файла) натуральных наблюдений. Дни декабря 356, 361 и 366; глубина 70 м; температура  $\approx 3,26$  °С; 3,10 °С; 2,95 °С. Дни января 1, 6 и 11; глубина 65 м, температура  $\approx 2,95$  °С; 2,82 °С; 2,68 °С

|        |                 |
|--------|-----------------|
| 356-70 | 3.260394337468  |
| 361-70 | 3.101089596929  |
| 366-70 | 2.9535398478903 |
| 1 -65  | 2.9547421980556 |
| 6 -65  | 2.8158267647481 |
| 11 -65 | 2.6825025816811 |

Наиболее востребованные месяцы для испытаний гидроакустических средств - май, июнь, июль, август и сентябрь. Периоды нагревания водной поверхности — май-август, период охлаждения — август-ноябрь. Было выбрано для расчета скорости звука в наборе данных (файле) натуральных наблюдений начало, середина и конец соответствующего месяца. Общее представление годового изменения температуры воды по глубине и расположение в Ладожском озере шести лимнических зон приведено в [4, 5, 8]. Пользователь атласа может воспользоваться в операционной системе WINDOWS приложением с графическим интерфейсом GUI в среде МАТЛАБа. Приложение может образовывать файл типа txt, содержащий значения глубин и скоростей звука. Для иллюстрации работы с атласом выбраны примеры снимков экрана (screenshot) для лимнической зоны VI, июль (рис. 1) и сентябрь месяцы (рис. 2), существенно различающиеся температурой верхнего слоя воды в среднемесячной оценке. На рис. 2 представлены оценки ВРСЗ для начала, середине и конца месяца.



Рис. 1. ВРСЗ для лимнической зоны VI, июль.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

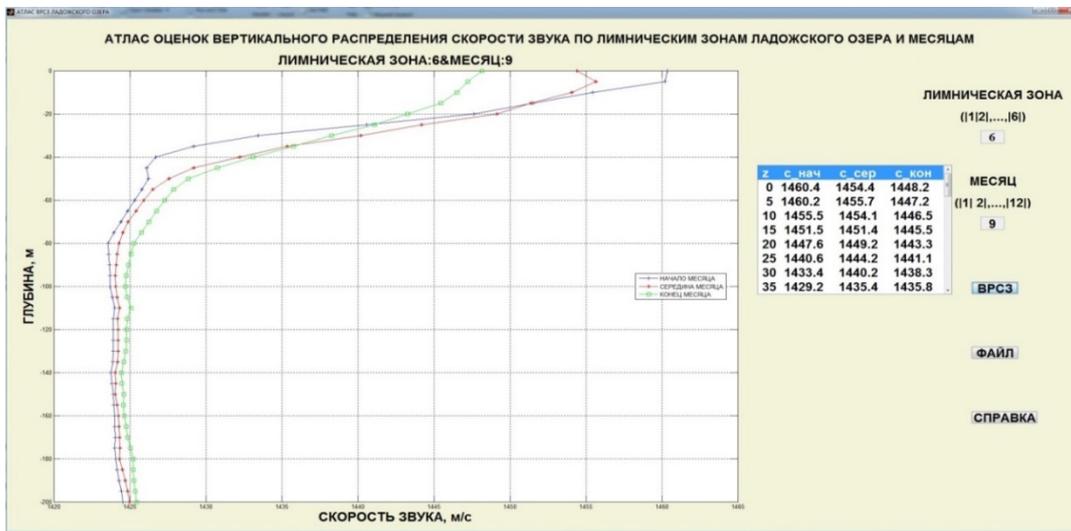


Рис. 2. ВРСЗ для лимнической зоны VI, сентябрь.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

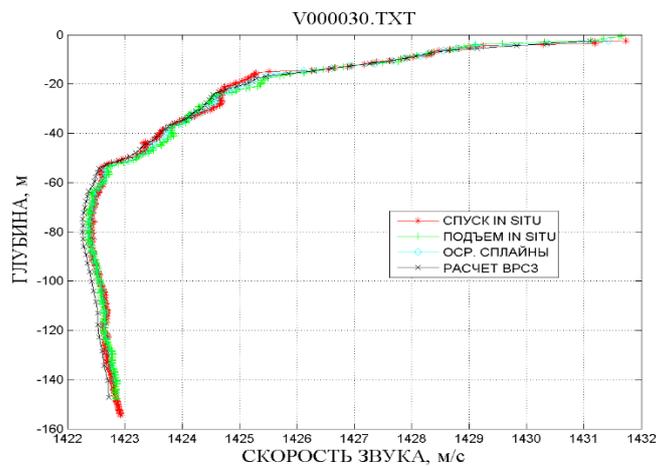


Рис. 3. Графики ВРСЗ in situ измерений.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Для сравнения на рис. 3 приведены графики ВРСЗ in situ измерений в районе юго-восточнее м. Куркиниemi. In situ измерения производились ГИСЗ miniSVP 19.06.14. Сравнение ВРСЗ рис. 3 и рис. 1 (начало июля) показывает, что имеет место практическое совпадение. Сдвиг по времени на две недели может характеризовать межгодовые и климатические (среднепогодные) вариации температуры воды лимнической зоны VI Ладожского озера [4, 5, 8].

При анализе ВРСЗ на рис. 1–3 следует иметь в виду, что изменение температуры на 1°С приводит к изменению скорости звука на 4,4–3,6 м/с в диапазоне температур 1–10 °С и на 3,6–2,7 м/с в диапазоне температур 10–20°С, например, [9, с. 8] Электронный атлас расчетных оценок ВРСЗ может использоваться инженерами-гидроакустиком для обеспечения испытаний на ладожском полигоне АО «Океанприбор».

#### *Литература*

1. Смирнов С. А., Полканов К. И. Морские испытания гидроакустической техники на опытовых кораблях и судах. СПб.: Наука, 2013.
2. Виноградов А. В., Борисов А. В., Киркин П. А. Новые возможности испытательного полигона ОАО «Концерн «Океанприбор» // Гидроакустика, 2013. Вып. 18(2). С. 96–99.
3. Микушин И. И., Серавин Г. Н. Методы и средства измерения скорости звука в море. СПб.: Судостроение, 2012.
4. Науменко М. А., Каретников С. Г., Гузиватый В. В. Пространственно-временная термическая дифференциация вод Ладожского озера // Докл. АН. 2000. Т. 373, № 2. С. 247–250.
5. Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата, Институт озероведения РАН, М., 2021.
6. Chen C-T.A., Millero F.J. Precise thermodynamic properties for natural waters covering only limnological rang // Limnol. Oceanogr., 31(3), 1986, p.p. 657-662.
7. Chen C-T. A., Millero F. J. Speed of sound in seawater at high pressures // J. Acoust. Soc. Amer., 1977, Vol. 62, № 5. P. 1129–1135.
8. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас. СПб.: Нестор-История, 2015.
9. Акустика океана / Под ред. акад. Л. М. Бреховских. М.: Наука, 1974.

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В УСЛОВИЯХ БАСЕЙНА

*А. К. Батанов, А. А. Кузьмин, И. С. Пестерев*, канд. техн. наук  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## METHOD OF MEASURING THE SENSITIVITY OF RECEIVING CHANNELS OF MULTI-ELEMENT ANTENNA ARRAYS UNDER BASIN CONDITIONS

*A. K. Batanov, A. A. Kuzmin, I. S. Pesterev*, Ph.D.  
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

*Представлена методика поканального контроля акустических характеристик многоэлементных антенных решеток различной геометрии, реализованная в измерительном бассейне с использованием координатных устройств и программируемых средств управления измерениями. Предложен вариант аппаратной и программной реализации измерительного комплекса бассейнового, который позволяет выполнить измерения согласно представленной методике.*

*A method for channel-by-channel monitoring of the acoustic characteristics of multi-element antenna arrays of various geometries, implemented in a measuring basin using coordinate devices and programmable measurement controls, is presented. A variant of the hardware and software implementation of the basin measuring complex is proposed, which allows measurements to be performed according to the presented method.*

**Введение.** Многоэлементные приемные гидроакустические антенны (МПА) для режима шумопеленгования размещаются в носовой оконечности подводного носителя и ввиду значительной апертуры являются одним из основных элементов его гидроакустического комплекса [1], поэтому к ним предъявляются повышенные требования по технологичности изготовления, испытаний и монтажа на носитель. Стандартом конструкции МПА является антенна из большого числа отдельных приемных блоков, размещенных на корпусе носителя под общим обтекателем. Перспективным вариантом исполнения МПА является антенна [2, 3], образованная набором однотипных приемных модулей, каждый из которых содержит звукопрозрачный корпус, между ребрами которого размещены гидроакустические приемники и звукопоглощающие акустические экраны, обтекатель в виде пластины из звукопрозрачной резины и гермоконтейнер с аппаратурой предварительной обработки сигналов. Элементарные приемные каналы (ЭПК) МПА должны соответствовать строгим требованиям к идентичности электроакустических характеристик, таких как чувствительность и динамический диапазон, в полосе рабочих частот. Измерение характеристик МПА стандартной конструкции, размещенной под общим обтекателем, является трудоёмкой и времязатратной операцией, поскольку производится после окончательной сборки антенны на носителе с применением габаритных измерительно-координатных устройств. Использование МПА модульной конструкции позволяет выполнять измерение характеристик ЭПК отдельных модулей в гидроакустическом бассейне до их установки на носитель, что существенно снижает стоимость и продолжительность испытаний. Тем не менее, значительные волновые размеры модулей, которые могут содержать до 100 и более ЭПК, ограничивают возможности их испытаний в бассейне, что приводит к необходимости проведения поканальных измерений.

**Принцип проведения поканальных измерений.** Для реализации предлагаемой методики контроля электроакустических характеристик отдельных ЭПК модулей МПА необходимо использовать гидроакустический бассейн, оснащенный подъемно-поворотным координатным устройством (ППКУ) с программным управлением. Принципиальная схема измерительного комплекса бассейнового (ИКБ) представлена на рис. 1, где введены следующие условные обозначения: 1 — гидроакустический бассейн; 2 — испытываемый ЭПК модуля МПА либо измерительный гидрофон; 3 – измерительный излучатель малого волнового размера (закреплен неподвижно); 4 — мост ППКУ; 5 — тележка ППКУ; 6 — подъемно-поворотная штанга ППКУ; 7 — генератор сигналов специальной формы; 8 — усилитель мощности; 9 — предварительный усилитель; 10 — осциллограф; 11 — цифровая система сбора данных.

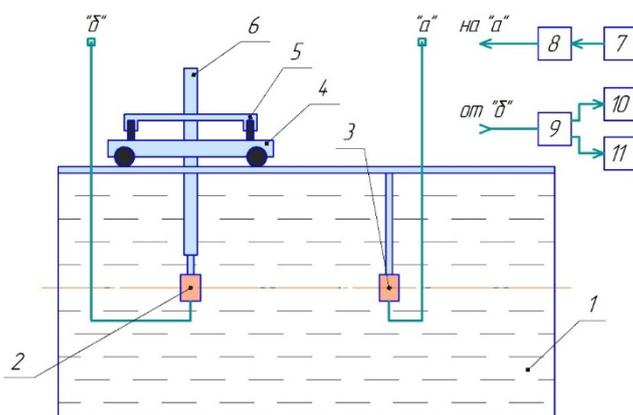


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного комплекса бассейнового (ИКБ).

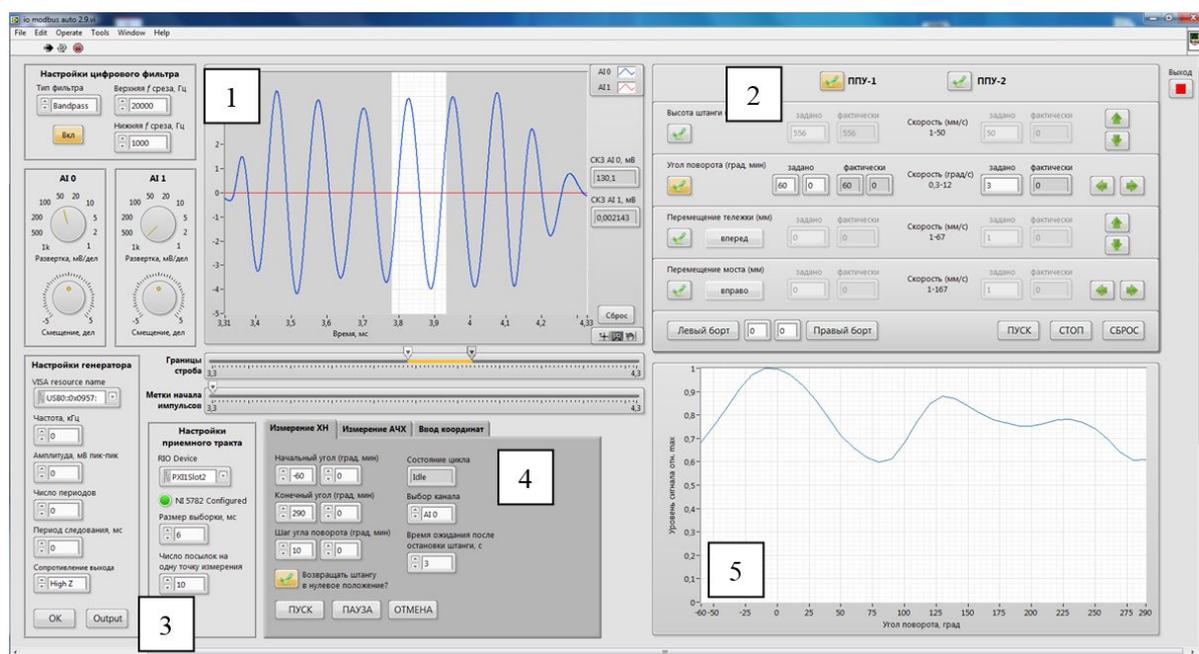


Рис. 2. Лицевая панель виртуального прибора управления ИКБ.

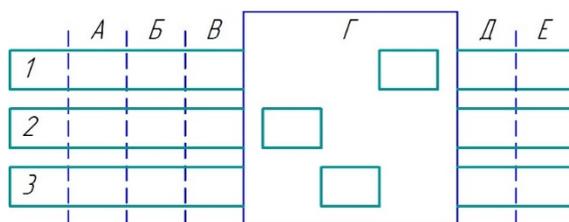


Рис. 3. Блок-схема автоматизированного измерительного процесса ИКБ.

Предлагаемая методика поканальных измерений параметров МПА строится следующим образом. Предварительно, на расстоянии от излучателя, соответствующем дальней зоне для отдельного ЭПК, устанавливается гидрофон, с помощью которого производится измерение звукового давления в сферической волне, формируемой излучателем, в полосе рабочих частот МПА. Затем поочередно выполняется установка на том же расстоянии от излучателя каждого ЭПК модуля МПА и измерение уровня сигнала с выхода ЭПК (метод замещения). При использовании изложенной методики могут выполняться измерения для модулей МПА практически любой конфигурации, в том числе имеющих форму участка цилиндрической или сферической поверхности, путем пересчета необходимого взаимного расположения каждого ЭПК и излучателя из соответствующей системы координат в декартовы координаты ППКУ.

**Аппаратная и программная реализация измерительного комплекса.** При построении ИКБ применены два ППКУ грузоподъемностью до 1500 кг, программное управление которыми осуществляется через приводы переменного тока по протоколу MODBUS RTU. Управление приводами ППКУ и процедурами измерений в целом реализовано с использованием мультиинтерфейсной платформы сбора и обработки данных на шине PXIe. Сбор и обработка аналоговых измерительных сигналов осуществляется при помощи модуля FPGA (ПЛИС) и адаптера аналого-цифрового преобразования с функцией внешней синхронизации запуска. Для управления функциями ИКБ был разработан виртуальный прибор, лицевая панель которого показана на рис. 2. На лицевой панели виртуального прибора можно выделить следующие области: 1) область отображения оцифрованных измерительных сигналов с настройками параметров вывода и границ измерительного строба; 2) область управления двумя ППКУ (ППУ-1 и ППУ-2) в полуавтоматическом режиме с заданием положения по 4-м координатам (включая поворот); 3) область управления внешним генератором сигналов специальной формы и измерительной частью ИКБ (здесь среди прочего задается число посылок измерительного сигнала на одну точку измерительного процесса, т. е. число наблюдений); 4) область задания параметров автоматизированных процессов измерения характеристик направленности (ХН) и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), а также позиционирования ЭПК модулей МПА; 5) область вывода графиков измеренных характеристик.

В основе работы виртуального прибора лежит независимое выполнение трех базовых циклов (условно показаны на рис. 3), в которых осуществляются: 1) опрос лицевой панели на предмет обнаружения действий оператора ИКБ; 2) опрос или установка состояния активного (используемого) ППКУ; 3) опрос модуля FPGA и прием цифровых данных измерительного сигнала. При проведении измерений обращение к базовым циклам поочередно осуществляется в каждой итерации измерительного процесса, построенного по принципу «конечного автомата».

Блок-схема автоматизированного процесса измерения чувствительности в режиме приема отдельных ЭПК модуля МПА изображена на рис. 3. На этапе А выполняется настройка ИКБ (установка параметров измерительного сигнала, измерение звукового давления излучателя), на этапе Б — вывод модуля в стартовое положение в полуавтоматическом режиме управления ППКУ, на этапе В — настройка измерительного процесса (ввод координат ЭПК, установка числа наблюдений). Этап Г представляет собой циклический автоматический измерительный процесс, на каждой итерации которого выполняется последовательное обращение к базовому циклу 2 (приведение очередного ЭПК в точку наблюдения), затем к циклу 3 (измерение уровня сигнала на выходе ЭПК) и циклу 1 (проверка отсутствия управляющих действий оператора ИКБ). По достижении последнего по счету измеряемого ЭПК модуля МПА этап Г завершается, после чего на этапе Д выполняется сохранение массива измеренных данных и виртуальный прибор переходит в режим ожидания (этап Е). При обнаружении выхода параметров отдельных ЭПК за допустимые пределы может быть выполнена их повторная проверка в ручном режиме.

**Заключение.** Использование представленной методики поканального контроля параметров МПА модульного исполнения и реализованного на базе гидроакустического бассейна измерительного комплекса позволило существенно повысить эффективность акустических испытаний, снизить их продолжительность, минимизировать методическую погрешность измерений. Разработанный измерительный комплекс применяется на всех этапах производственного контроля акустических характеристик выпускаемых изделий, а также – имеет аппаратные и программные мощности для осуществления потокового информационного обмена с цифровыми приемными антеннами, что открывает широкие возможности дальнейшей автоматизации измерительных процессов.

#### *Литература*

1. Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы / Под ред. Ю. А. Корякина, С. А. Смирнова, Г. В. Яковлев. СПб.: Наука, 2004. 410 с.
2. Батанов А. К., Бродский Б. М., Машошин А. И. Новые технологии создания гидроакустических антенн для подводных лодок // Тр. XIV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2018. С.134–135.
3. Батанов А. К., Бродский Б. М., Кузьмин А. А. Перспективная конструкция гидроакустической антенны для подводных лодок // Тр. XIV Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2018. С.136–137.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ В ГИДРОСФЕРЕ НА БАЗЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Э. В. Кречетова<sup>1</sup>, В. Л. Мартынов<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук, М. С. Шиманская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>АО «Концерн «Морское подводное оружие - Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## IMPROVEMENT OF TELECOMMUNICATIONS IN THE HYDROSPHERE BASED ON FIBER-OPTIC TECHNOLOGIES

E. V. Krechetova<sup>1</sup>, V. L. Martynov<sup>1,2</sup>, Dr.Sc., M. S. Shimanskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

*Не вызывает сомнений, что в основном коммуникации в гидросфере осуществляются в гидроакустическом поле. Разнообразные преобразователи акустических антенн, размещаемых на кораблях флота, обеспечивают формирование сигналов, несущих информацию об обнаруженных объектах. Как повысить эффективность поиска малошумных подводных роботов, минимизировав недостатки пьезокерамических преобразователей? Какие технологические решения можно предложить? Об этом — данная статья.*

*There is no doubt that most communications in the hydrosphere are carried out in the hydroacoustic field. Various converters of acoustic antennas placed on ships of the fleet provide the formation of signals carrying information about detected objects. How to increase the efficiency of the search for low-noise underwater robots, minimizing the disadvantages of piezoceramic converters? What technological solutions can be offered? That's what this article is about.*

Исследования, проведённые российскими учёными, среди которых АО «Концерн «МПО – Гидроприбор» (далее — Концерн) и Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург (далее — ИТМО), показали, что одним из главных недостатков акустических преобразователей является то, что формируемый на них полезный сигнал является аналоговым. К прочим недостаткам гидроакустических датчиков можно отнести:

- 1) искажение сигнала электромагнитными наводками;
- 2) невысокая вероятность обнаружения малошумящих объектов – подводных роботов;
- 3) большие габариты;
- 4) сложность мультиплексирования;
- 5) большое время обработки данных;
- 6) потеря оперативности в принятии решения;
- 7) спектральный диапазон смещён в область более высоких частот, в то время как шумы винтов подводных роботов соответствуют низкому диапазону частот порядка 10...62 Гц.

Эти недостатки можно устранить путём перевода аналогового сигнала, снимаемого с акустических датчиков на пьезокерамических элементах, в оптический диапазон, так как световой поток пассивен к электромагнитным наводкам. Идея достигается заменой гидроакустических пьезокристаллах датчиков на так называемые волоконно-оптические датчики. Специалисты Концерна считают, что в качестве волоконно-оптических датчиков целесообразно рассмотреть волоконно-оптические фазовые интерферометрические датчики (сокращённо — фазовые датчики). Их целесообразность определяется тем, что фазовые датчики являются потенциально наиболее чувствительными, так как в оптической измерительной технике фазовые измерения принадлежат к числу наиболее чувствительных, тонких методов. Они в большей степени подходят для поиска малошумных подводных роботов. Результаты фундаментальных исследований, проведённых учёными ИТМО, это подтвердили. В целом же, в волоконно-оптических датчиках оптическое волокно используется не только как среда для передачи информации, но и как высокочувствительный измерительный элемент. Разработки в области использования оптического волокна для регистрации гидроакустического давления начались в США еще в 1970-х гг. XX в. [1, 2]. Значительные усилия, которые были направлены американцами на разработку волоконно-оптических датчиков, диктовались рядом их

преимуществ по сравнению с традиционными гидроакустическими, выполненными на основе пьезокерамических преобразователей.

К числу основных достоинств волоконно-оптических датчиков можно отнести:

- высокую чувствительность;
- широкий динамический диапазон;
- малые вес и размеры;
- возможность мультиплексирования большого числа датчиков на одном оптическом волокне;
- возможность удаленного опроса датчиков по связному оптическому волокну на дальности в десятки километров;
- нечувствительность к электромагнитным помехам, то есть полная электрическая пассивность;
- отсутствие электрического питания, подводимого к чувствительной части;
- низкая себестоимость изготовления при массовом производстве.

Разработка волоконно-оптических гидроакустических датчиков, то есть волоконно-оптических гидрофонов отечественного производства является востребованным направлением технологического переоснащения кораблей ВМФ, способным решить существующие задачи по обнаружению и идентификации малозумящих объектов в водной среде. Эти датчики строятся на основе нескольких основных интерферометрических оптических схем, реализованных в интерферометрах Маха-Цендера, Майкельсона, Саньяка, Фабри-Перо и на волоконных брэгговских решетках, играющих ключевую роль. В волоконно-оптических датчиках реализуется так называемый интерферометрический метод, который обеспечит существенное повышение их чувствительности в режиме приёма сигналов от малозумящих целей. Суть наиболее простого интерферометрического метода состоит в том, что одновременно с исследуемой волной, проходящей через чувствительное плечо интерферометра, создаётся когерентная ей волна, имеющая ту же поляризацию, которая направляется через другое, так называемое опорное плечо. В волоконно-оптических гидрофонах данный метод реализуется по различным оптическим схемам, одна из которых приведена на рис. 1 [1] здесь: ИИ — источник излучения; ФП — фотоприёмник. Основная идея опорного плеча заключается в создании условий, обеспечивающих интерференцию световых импульсов от источника излучения после соответствующей обработки сигнала. В интерферометрических оптических схемах опорное и чувствительное плечи могут быть разнесены в пространстве, что является достоинством, так как упрощает процесс конструирования волоконно-оптических гидрофонов.

Чувствительное плечо — наиболее значимая часть конструкции, изображённой на рис. 1, так как в реальных схемах в нём размещаются так называемые решётки Брэгга — чувствительные элементы волоконно-оптических гидрофонов — (рис. 2, слева), реагирующие на избыточное забортное давление от шумящих целей изменением своей структуры — периода решётки.

В левой части рис. 2 в виде схемы представлен общий вид волоконно-оптического гидрофона, позволяющий упрощённо изложить идею повышения его чувствительности. В правой части этого же рисунка графически показаны узловые моменты работы этой схемы. В состав чувствительного элемента, условно являющегося аналогом акустической антенны, входит оптоволокно (ОВ), в котором размещаются решётки Брэгга. Работа схемы реализуется при наличии двух таких решёток, отстоящих друг относительно друга на некотором расстоянии « $L$ ». Для обеспечения «набега» (увеличения) фазы между двумя соседними импульсами, это расстояние выбирается порядка 5 м.

Источник излучения (ИИ) является элементом конструкции оптического гидрофона и представляет собой лазер, работающий в импульсном режиме. Он генерирует периодическую последовательность световых сигналов. Каждый из этих импульсов, проходя по оптоволокну (ОВ) через оптический циркулятор (ОЦ), достигает чувствительного элемента, а точнее — волоконной брэгговской решётки № 1 (ВБР<sub>1</sub>). Частично отражаясь от неё и частично проходя дальше, данный импульс отражается и от ВБР<sub>2</sub> [2].

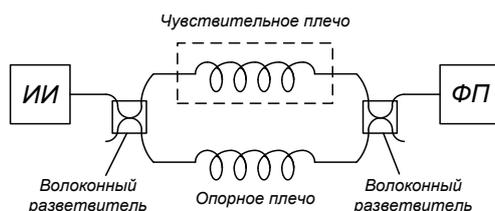


Рис. 1. Оптическая интерферометрическая схема построения волоконно-оптических гидрофонов.

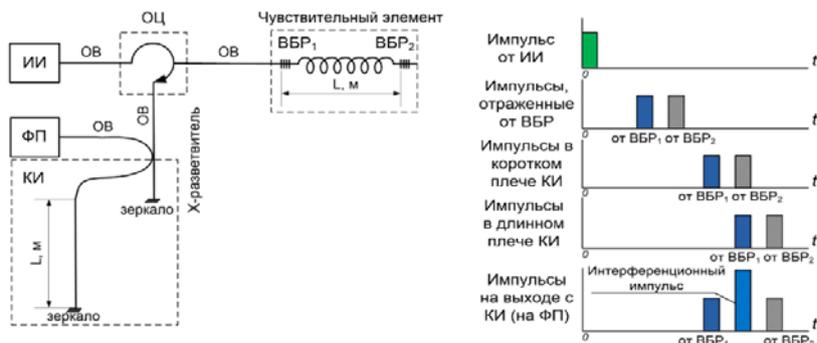


Рис. 2. Структурная оптическая схема волоконно-оптического гидрофона на брэгговских решетках (слева) и схема следования импульсов в оптической схеме (справа).

Здесь ОВ — оптоволокно; ОЦ — оптический циркулятор; ВБР — волоконные брэгговские решётки; КИ — компенсационный интерферометр; ФП — фотоприёмник; ИИ — источник излучения. После этого в обратном направлении следует уже пара оптических импульсов, что представлено на правом рис. 2 на втором графике сверху. Задержка между ними во времени равна удвоенному времени распространения оптического излучения между ВБР<sub>1</sub> и ВБР<sub>2</sub>. Сдвиг фаз вновь образованной пары зависит от периода брэгговских решёток, определяемых избыточным давлением от шумящих целей. Двигаясь в обратном направлении через оптический циркулятор, эта пара импульсов попадает в компенсационный интерферометр (КИ), где разделяются, в свою очередь, ещё на две пары, одна из которых следует по его короткому, а вторая — по длинному плечу. Идея этого заключается в том, чтобы после прохождения компенсационного интерферометра оптический импульс от ВБР<sub>2</sub> в коротком его плече совпадал по времени с импульсом от ВБР<sub>1</sub> в длинном плече КИ, что демонстрируют третий и четвёртый графики сверху на рис. 2. Разность длин плеч в коротком и длинном плечах циркулятора равна расстоянию между ВБР<sub>1</sub> и ВБР<sub>2</sub>, и составляет величину  $L$ . В результате на фотоприёмник (ФП) приходит группа из трёх оптических импульсов, центральный из которых является интерференционным - нижний график на рис. 2.

Таким образом, деформация оптического волокна между двумя ВБР в результате внешнего гидроакустического воздействия вызывает изменение разности фаз интерферирующих импульсов, что и регистрируется фотоприёмником. В результате на фотоприёмник (ФП) приходит группа из трех оптических импульсов, центральный из которых является интерференционным и содержит информацию об акустическом воздействии на чувствительный элемент. Сказанное означает, что интерференционный импульс представляет собой суммарную интенсивность сигналов длинного и короткого плеч компенсационного интерферометра, а его параметры – амплитуда, форма, частотный спектр, зависят от сдвига фаз между световыми импульсами, отражёнными от ВБР<sub>1</sub> и ВБР<sub>2</sub> чувствительного элемента в соответствии с графиком на рис. 2 (второй сверху). Этот сдвиг фаз определяется периодом брэгговских решёток, который, в свою очередь, зависит от избыточного давления, образуемого в водной среде шумящими целями, например, подводными роботами вероятного противника.

Реальное фото интерференционного импульса, полученного нашими коллегами – учёными ИТМО, представлено на рис. 3 [2]:

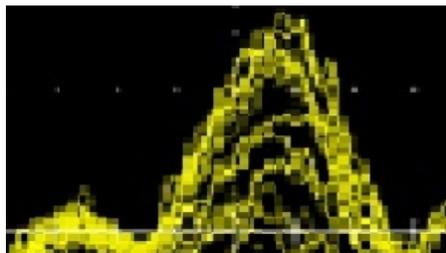


Рис. 3. Интерференционный импульс.

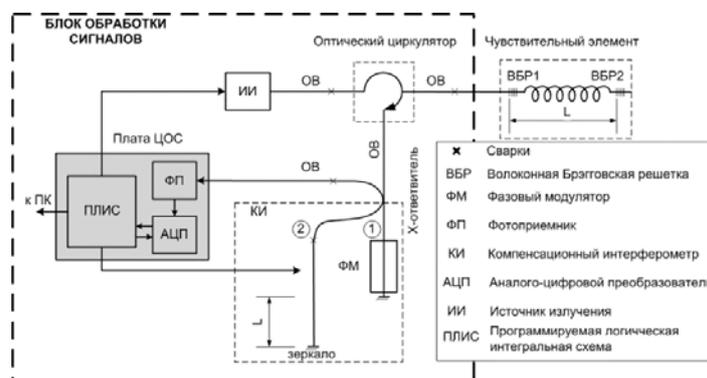


Рис. 4. Структурная схема одиночного волоконно-оптического датчика гидроакустического давления на основе решёток Брэгга.

Качество снимка определяется разрешением осциллографа. Внутри импульса просматриваются полосы интерференции. Самым важным является то, что этот интерференционный сигнал, несущий информацию о шумящих целях, является оптическим (световым) и никак не подвержен искажениям электромагнитными полями.

Амплитудно-частотная характеристика полученного сигнала содержит информацию об акустическом воздействии на чувствительный элемент. По значению амплитуды определяется интенсивность шумящей цели, косвенно характеризующей дальность до источника шума. Спектр же сигнала представляет собой частотный образ обнаруженного объекта. После фотоприёмника сигналы усиливаются каскадом операционных усилителей и направляются на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — рис. 4 [2], здесь представлена упрощённая структурная схема одиночного волоконно-оптического датчика гидроакустического давления на основе решёток Брэгга.

**Выводы.** Предложенные новые технологии, которые в состоянии обеспечить эффективное обнаружения подводных роботов вероятного противника. Их производство не зависит от поставок из-за рубежа, а может быть реализовано на отечественных предприятиях для создания многофункциональных роботизированных комплексов двойного назначения.

#### Литература

1. Варжель С. В., Куликов А. В., Захаров В. В., Асеев В. А. Одноимпульсная запись и визуализация волоконных решеток Брэгга типа II // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 5(81). С.25–28.
2. Варжель С. В. Брэгговские дифракционные структуры для волоконно-оптических измерительных систем: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.05. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2012. 142 с.

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО БУЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОРСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Б. И. Исрафилов, М. А. Дубатков  
АО «Корпорация «Комета», Москва, Россия

## METHOD OF DEPTH EVALUATION OF A POSITIONAL HYDROMETEOROLOGICAL BUOY UNDER INFLUENCE OF SEA FLOWS

B. I. Israfilov, M. A. Dubatkov  
JSC «Corporation «Kometa», Moscow, Russia

*В работе приводится метод решения задачи определения местоположения элементов позиционного гидрометеорологического буя в водной среде. При решении задачи учитываются данные о подводных морских течениях, а также о геометрической конфигурации буя. Гидродинамические параметры буя определяются с помощью CFD-моделирования. Разработанный метод позволяет оценивать положение элементов буя в широком диапазоне начальных условий с использованием разных вариантов исполнения буя и разных параметров морских течений.*

*This work presents a method of solution to the problem of determining the location of the elements of a positional buoy in the water environment. When solving the problem, data about the underwater sea flow and also the geometric configuration of the buoy are taken into account. The hydrodynamic parameters of the buoy are determined using CFD-modeling. The developed method makes it possible to evaluate the position of the buoy elements in a wide range of initial conditions using different buoy models and different parameters of sea currents.*

На сегодняшний день актуальным направлением является развитие систем мониторинга гидрометеорологических явлений в морских условиях для получения данных в режиме реального времени для разнообразных внешних условий. Для исследования конкретного района на заданной глубине встаёт вопрос удержания элементов системы мониторинга в стационарной точке в условиях движения масс воды, причем с разными скоростями и направлениями. Исходя из этого, в ходе проектирования систем мониторинга перед выполнением дорогостоящих работ по изготовлению и постановке элементов на позицию имеет смысл проводить виртуальные эксперименты на компьютерной модели, о которой и пойдёт речь в данной статье. В качестве элемента системы мониторинга гидрометеорологических явлений в настоящей статье рассмотрена гидрометеорологическая станция, состоящая из цилиндрического буя, находящегося в толще воды, троса (буйрепа) и якоря (рис. 1). Описанная выше конфигурация обтекается потоком жидкости (подводные течения водоемов). Вследствие этого течения возникают силы и моменты, отклоняющие буй и трос от их положения в случае отсутствия течений, как показано на рис. 1. Необходимо определить положение буя относительно якоря и угол наклона буя относительно горизонтальной плоскости, а также силы, действующие на буй и трос в совокупности.

Для решения задачи необходимо разбить её на две отдельные подзадачи:

- определение гидродинамических коэффициентов с помощью расчета с применением CFD-моделирования;
- решение уравнений равновесия методом последовательных приближений.

Далее подробно рассмотрим каждую подзадачу.

**Определение гидродинамических коэффициентов.** CFD-моделирование позволяет оценить гидродинамические параметры исследуемого объекта. Сам процесс решения можно разбить на три основных этапа:

1. Подготовительный этап. Подготовка 3D-модели, определение физических данных, задание начальных и граничных условий, построение расчетной сетки.
2. Расчет. На этом шаге компьютер производит численное решение основных уравнений и записывает их в память.
3. Анализ. В заключении пользователь может вывести исследуемое значение, построить картину обтекания, визуализировать эпюру распределения давления и многое другое (рис. 2).

Стоит отметить и некоторые особенности работы с CFD. При подготовке 3D-модели следует «вырезать» исследуемое тело из объёма жидкости или газа (расчетной области), к примеру, из сферы радиусом 10 характерных размеров, если речь идет о внешней гидроаэродинамике (размеры расчетной области вычисляются индивидуально для каждой задачи). Также одним из важных и сложных этапов является построение расчетной сетки. Объем, занимаемый жидкостью или газом, делится на отдельные ячейки. Сетка может быть однородной или неоднородной, структурированной или неструктурированной, состоящей из комбинации гексаэдрических, тетраэдрических, призматических, пирамидальных или многогранных элементов. Структурированная сетка (рис. 2) строится автоматически после задания пользователем её параметров, зачастую её достаточно, однако в ряде случаев имеет смысл строить неструктурированную сетку вручную. К ней прибегают для работы со сложной геометрией, оптимизации времени расчета и т.п. CFD-моделирование позволяет рассчитать нагрузки, оказываемые на тело потоком жидкости под разными углами атаки.

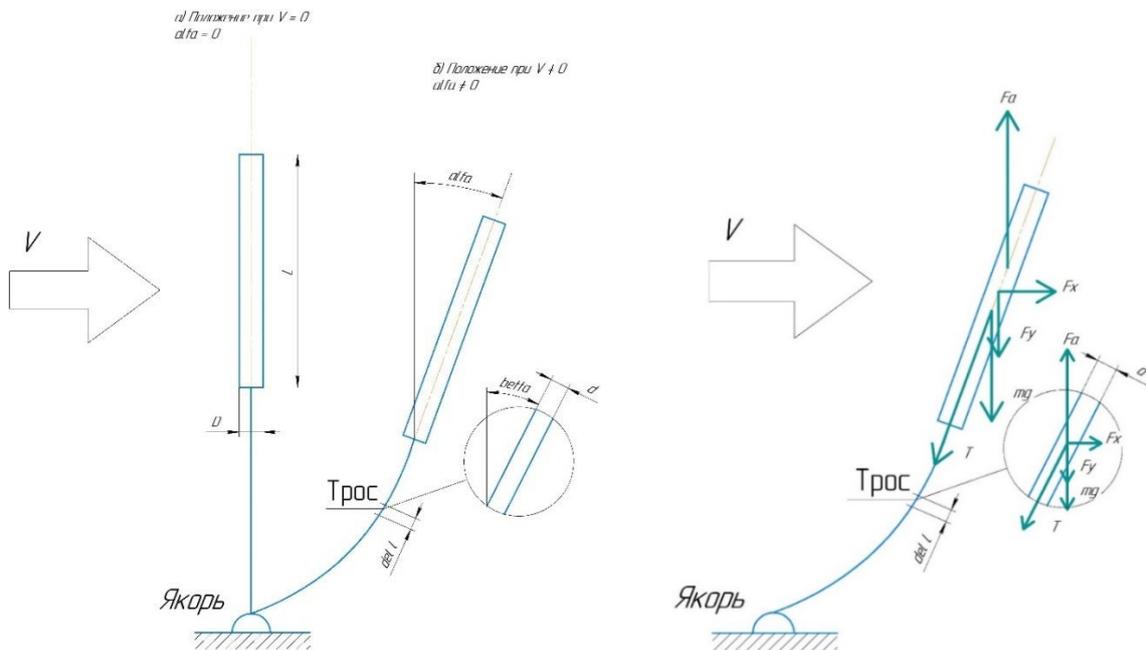


Рис. 1. Изменение положения в морском течении.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

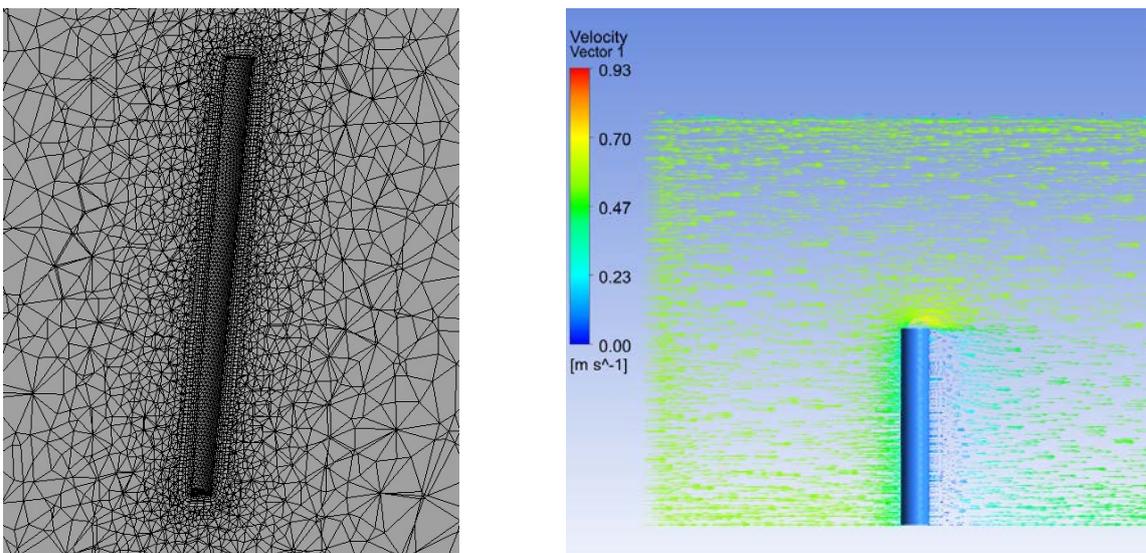


Рис. 2. Демонстрация расчетной сетки и визуализация результатов расчета на примере исследуемого буя.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Далее, эти нагрузки можно отнести к одной характерной площади и получить зависимость коэффициентов гидродинамического сопротивления и подъёмной силы от угла атаки

$$C_{x,y} = \frac{F_{x,y}}{q \cdot S}, \quad (1)$$

где  $F_{x,y}$  — проекции нагрузки;  $C_{x,y}$  — гидродинамические коэффициенты;  $q = \rho v^2/2$  — скоростной напор;  $v$  — скорость потока;  $S$  — характерная площадь.

**Решение уравнений равновесия.** Для оценки заглубления бую под воздействием морских течений необходимо рассчитать силы, действующие на систему буй-якорь-трос, при этом якорь считается неподвижным. Трос представляется в виде набора  $N$  неупругих нерастяжимых стержней, соединенных шарнирами, длиной  $\Delta l_{mp} \ll L$ , где  $L$  — длина троса. Силы, действующие на элемент троса, и его положение равновесия определяются методом последовательных вычислений. В первую очередь составляются уравнения равновесия для бую (рис. 1). Проекция сил натяжения первого элемента троса  $T_{y,0}$ ,  $T_{x,0}$  со стороны бую массой  $m$  можно определить из уравнения

$$\begin{cases} T_{y,0} = F_a - mg - F_y; \\ T_{x,0} = F_x, \end{cases} \quad (2)$$

где  $F_a$  — выталкивающая сила, действующая на буй;  $F_x$  — сила гидродинамического сопротивления;  $F_y$  — подъёмная гидродинамическая сила (в нашем случае направлена вниз из-за угла обтекания)

$$F_{x,y} = C_{x,y} \cdot q \cdot S, \quad (3)$$

где  $C_x$ ,  $C_y$  — коэффициенты гидродинамического сопротивления и гидродинамической подъёмной силы соответственно, определенные по результатам решения первой подзадачи.

Для  $i$ -го элемента троса система уравнений равновесия принимает вид, аналогичный системе (2). Здесь силы принимаются для элемента троса и складываются по соотношениям

$$\begin{cases} \Delta T_{y,i} = F_{amp} - mg_{mp} - F_{ymp}; \\ \Delta T_{x,i} = F_{xmp}, \end{cases} \quad (4)$$

Для вычисления силы натяжения  $i$ -го элемента троса со стороны бую последовательно складываются получаемые силы с предыдущими

$$\begin{cases} T_{y,i} = T_{y,i-1} + \Delta T_{y,i} \\ T_{x,i} = T_{x,i-1} + \Delta T_{x,i} \end{cases} \quad (5)$$

Для определения угла наклона элементов троса используем соотношение

$$\Delta \varphi_i = \arctan(T_{y,i} / T_{x,i}). \quad (6)$$

Для построения изгиба (траектории) троса определим координаты и используем выражения

$$X_i = \Delta l_{mp} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Delta \varphi_i\right) + X_{i-1}; \quad (7)$$

$$Y_i = \Delta l_{mp} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \Delta \varphi_i\right) + Y_{i-1}. \quad (8)$$

Стоит отметить, что углы отклонения троса  $\Delta\varphi_i'$  получаются из расчета натяжения вдоль троса начиная от буя к якорю, однако построение изгиба троса по полученным углам начинают от якоря к бую, поэтому штрих в данном случае означает смену порядка выбора  $i$ .

Заглубление буя относительно положения в отсутствии течений определяется как

$$Z = L - \sum_i \Delta l_{mp} \cdot \sin(\Delta\varphi_i') \quad (9)$$

где  $L$  — длина троса.

По параметру  $Z$  определяется глубина текущего элемента троса и соответственно скорость течения на этой глубине. Далее процесс расчета повторяется до тех пор, пока предыдущее значение не будет отличаться от текущего на заданную величину точности. Для оценки угла отклонения буя рассчитаем моменты, действующие на него (рис. 2)

$$M_{mg} = mg \cdot l_1 \cdot \cos \alpha ; \quad (10)$$

$$M_{F_y} = F_y \cdot l_2 \cdot \cos \alpha ; \quad (11)$$

$$M_{F_x} = F_x \cdot l_2 \cdot \sin \alpha ; \quad (12)$$

$$M_{(Fa-Fy)} = (Fa - Fy) \cdot l_2 \cdot \cos \alpha . \quad (13)$$

Приравняв их сумму к нулю и проводя некоторые преобразования, мы получим формулу для оценки угла наклона буя относительно горизонтальной оси

$$\alpha = \arctan \left( - \frac{(mg \cdot l_1 - (Fa - Fy) \cdot l_2)}{Fx \cdot l_2} \right), \quad (14)$$

где  $l_1$  — расстояние от точки крепления троса до центра масс;  $l_2$  — расстояние от точки крепления троса до геометрического центра.

Таким образом, описанный выше алгоритм определения положения буя относительно якоря при воздействии морских течений сводится к следующему:

- 1) с применением CFD-моделирования определяются коэффициенты гидродинамического сопротивления буя и троса в зависимости от угла атаки;
- 2) рассчитывается силы, действующие на буй: сила тяжести, сила Архимеда, сила гидродинамического сопротивления, подъёмная сила;
- 3) из уравнения равновесия буя определяется сила, действующая на трос со стороны буя;
- 4) начинается цикл расчетов по элементам троса. Рассчитываются силы, действующие на элемент троса, и складываются с результирующей силой предыдущего участка;
- 5) определяется положение буя и элементов троса относительно якоря;
- 6) перечисления 2–5 повторяются для новых глубин расположения буя и троса до тех пор, пока предыдущее заглубление буя не будет отличаться от текущего на величину заданной точности решения;
- 7) определяется угол наклона буя относительно вертикального положения при найденной величине заглубления и соответствующей ей скорости течения.

В работе приведено описание метода, позволяющего прогнозировать величину заглубления подводного буя гидрометеорологической станции, его смещение по горизонтали и угол наклона, возникающие вследствие воздействия на станцию подводных течений. Модель учитывает реальные гидродинамические характеристики буя, полученные с применением методов CFD-моделирования. Использование разработанной модели упрощает работу при создании различных исследовательских гидрометеорологических систем, увеличивает точность получения результатов и значительно удешевляет разработку на этапе их проектирования.

#### **Литература**

1. Берто Г. О. Океанографические буи // Сер. «Техника освоения океана». М.: Судостроение, 1979.
2. Егоров В. И. Подводные буксируемые системы. М.: Судостроение, 1981.
3. Ремез Ю. В. Качка корабля. М.: Судостроение», 1983.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ СВЯЗИ

*A. M. Грузликов, канд. техн. наук, А. В. Кулаков, Е. В. Лукоянов, канд. техн. наук, Д. А. Мухин, Ю. М. Скородумов, канд. техн. наук, А. Б. Торопов, канд. техн. наук*  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## DEVELOPMENT RESULTS OF THE UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM

*A. M. Gruzlikov, Ph.D., A. V. Kulakov, E. V. Lukoyanov, Ph.D., D. A. Mukhin, Yu. M. Skorodumov, Ph.D., A. B. Toropov, Ph.D.*  
JSC «Concern «CSRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

*В настоящее время идет активное освоение морских ресурсов, что требует создания нового оборудования и технологий, включая разработку мультиагентных систем с использованием автономных обитаемых подводных аппаратов. В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» ведутся работы по созданию аппаратно-программных средств звукоподводной связи с возможностью организации сетевого взаимодействия абонентов. В докладе представлены результаты разработки и испытаний гидроакустической аппаратуры, полученные в стендовых и натурных условиях.*

*Nowadays, there is an active exploitation of marine resources, which requires the development of new systems and technologies, including multi-agent systems using autonomous underwater vehicles. There are hardware and software parts of underwater acoustic communication and navigation systems with the ability to organize network interaction of nodes are designed in CSRI Elektropribor. The results of the underwater acoustic communication system investigation and tests in laboratory and real conditions are presented in the article.*

**Введение.** Изучение мирового океана и освоение морских ресурсов сопровождается созданием нового оборудования и технологий, в том числе мультиагентных систем с использованием групп автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА) [1]. Одной из ключевых задач, влияющих на исход выполнения миссии группой АНПА, является наличие устойчивой связи между абонентами сети, а также обеспечение взаимного позиционирования относительно друг друга [2–7]. Однако у отечественной гидроакустической связи имеется существенное ограничение — информационное взаимодействие только в режиме точка-точка между парой абонентов. Данное ограничение является критичным для подводных сетевых и робототехнических систем, в которых наличие одновременной связи и взаимного позиционирования множества корреспондентов друг с другом является принципиально необходимым. В связи с этими обстоятельствами в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (далее — Концерн) на протяжении последних лет ведутся работы над построением таких систем. В настоящем докладе излагаются результаты работ в этом направлении.

**Концепция организации сетевой гидроакустической связи.** Качество звукоподводной связи, дальность ее действия и скорость передачи информации непосредственно зависят от полосы рабочих частот связного сигнала, гидроакустических условий распространения связного сигнала, и от отношения сигнал/помеха (ОСП) в точке его приема [8–10]. В связи с этим, концепция организации сетевой гидроакустической связи подразумевает построение множества отдельных гидроакустических сетей с дальностью связи 1–2 км для решений конкретных тактических задач, работающих в частотных диапазонах, лежащих выше верхних частот шумов систем и механизмов АНПА и позволяющих обеспечить высокую потенциальную скорость передачи информации. Информационный обмен между такими подсетями, а также передача в них или получение из них оперативной информации осуществляется в нижнем диапазоне частот, обеспечивающем устойчивую связь на дистанциях десятков километров. Кроме того, такая организация связи позволит сохранить совместимость с существующими стандартами гидроакустической связи и частотными диапазонами для потребителей (рис. 1).

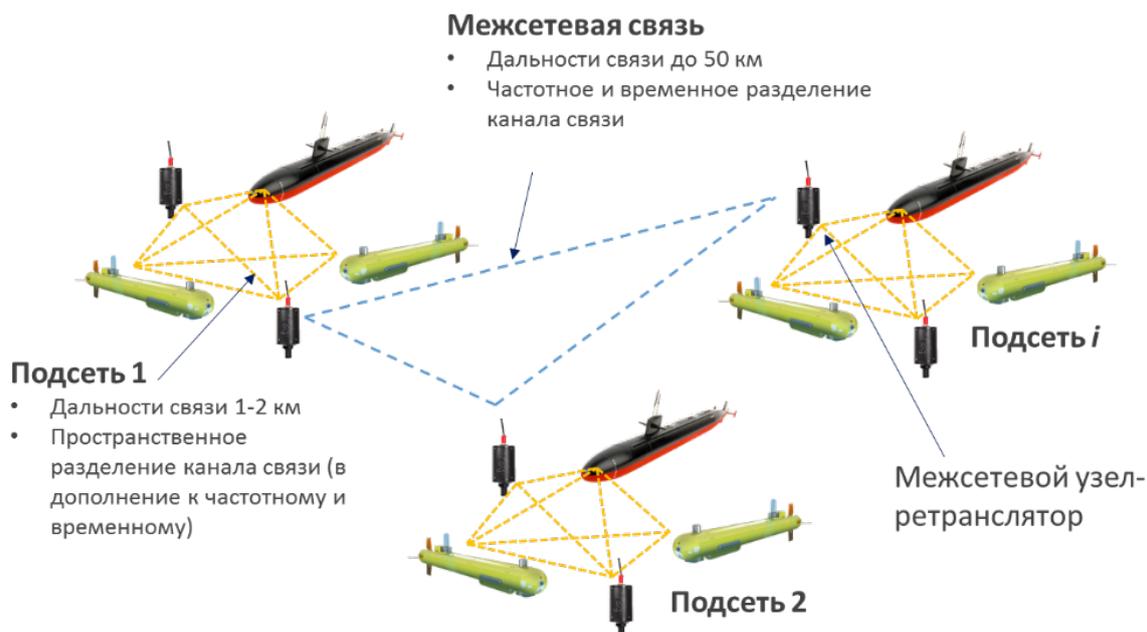


Рис. 1. Структурная схема организации СГС.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

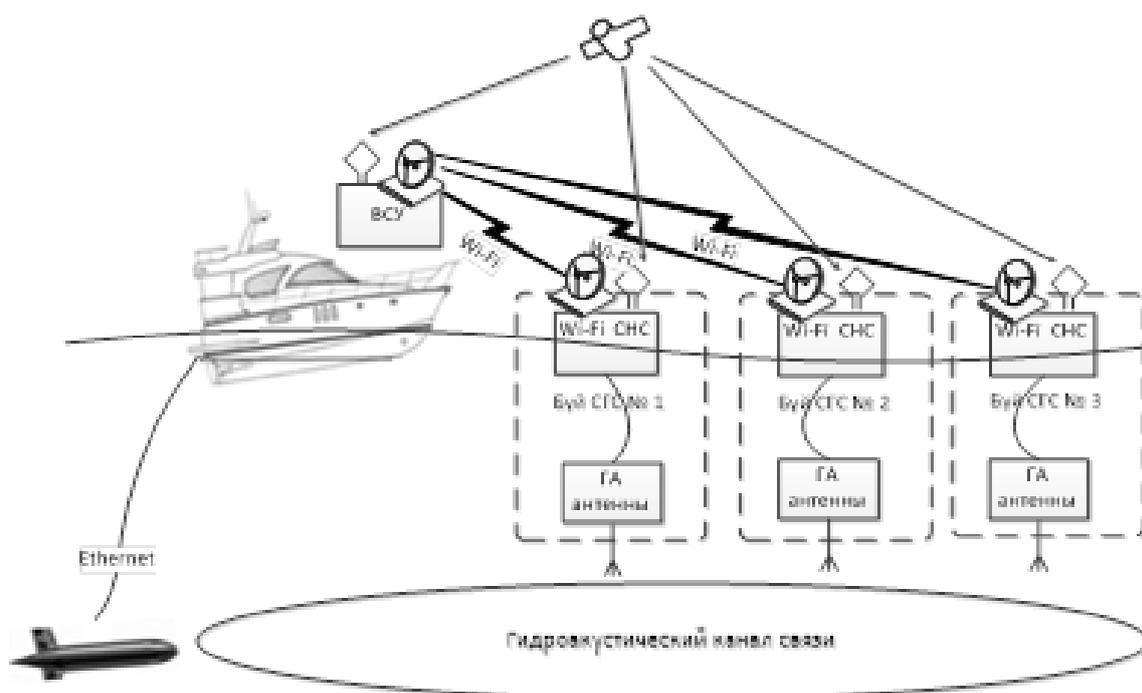


Рис. 2. Структурная схема экспериментального образца АПС СГС.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**Сетевая связь ближнего действия.** Созданный в Концерне экспериментальный образец аппаратно-программных средств (далее — АПС) сетевой гидроакустической связи (далее — СГС) предназначен для отработки основных технических решений, включая протоколы информационно-технического взаимодействия (далее — ИТВ) абонентов подводной сети, их навигационного обеспечения, накопления телеметрических данных. АПС СГС представляют собой три дрейфующих узла (буи) и один мобильный узел (буксируемый подводный аппарат — далее БПА, имитирующий АНПА). Структурная схема экспериментального образца приведена на рис. 2. Все узлы оснащены ненаправленными в горизонтальной плоскости излучающими гидроакустическими антеннами и приемными антенными решетками, обеспечивающими

пространственное разделение каналов приема с охватом в  $360^\circ$  в горизонтальной плоскости (до 33 пространственных каналов). Аппаратура узлов также содержит электронные модули формирования и приема сигналов (включая ЦАП, АЦП, активные фильтры и усилители), вычислительный модуль, аккумуляторную систему электропитания, приемник спутниковых навигационных сигналов (СНС) для определения собственных координат и набор интерфейсных модулей для обеспечения взаимодействия с узлами сети посредством внешней системы управления. При разработке АПС СГС учитывался ранее полученный опыт Концерна в части осуществления гидроакустической связи с быстроходным подводным объектом [11]. Для реализации информационного обмена по гидроакустическому каналу связи ближнего действия использован комбинированный сигнал, состоящий из синхронизирующей и информационной компонент. Детектирование сигнала связи производится путем обнаружения синхронизирующей компоненты (на основе массива тональных сигналов разной частоты) методом согласованной фильтрации с одновременной оценкой доплеровского смещения частоты. Передача целевой информации производится с использованием BPSK кодирования, обеспечивающего высокую скорость передачи данных при приемлемом уровне вероятности битовой ошибки, при использовании контрольной суммы, сформированной как циклический избыточный код требуемой разрядности [10]. Созданный образец АПС СГС позволил отработать алгоритмы взаимного позиционирования подводных абонентов. В частности, проверялась задача навигации подвижного подводного объекта по информации от трех дрейфующих буев, фактически имитирующая работу длиннобазовой гидроакустической навигационной станции. Отличительной особенностью разработанных для навигации алгоритмов заключалась в использовании не только дальностей, но и скорости Доплера, по аналогии с разработанными ранее алгоритмами одномаяковой навигации [12, 13], что позволило повысить эффективность навигационного решения. Это позволило создать задел в области разработки подобных систем.

Проведенные испытания АПС СГС с участием представителей заинтересованных организаций судостроения, подтвердили эффективность выбранных технических решений и близкие к мировым аналогам характеристики.

**Межсетевая связь дальнего действия.** В рамках инициативной работы Концерна разработан экспериментальный образец АПС подсистемы дальней гидроакустической связи (ПГС), позволяющей осуществлять передачу информацию на дистанции нескольких десятков километров. Для реализации информационного обмена по гидроакустическому каналу связи дальнего действия использован шумоподобный фазоманипулированный сигнал на основе псевдослучайных последовательностей максимальной длины (M-последовательностей) [10]. Разработанный образец ПГС совместим с существующим стандартами связи на уровне протоколов и структуры сообщений, конструктивно представляет собой комплект модулей в формате Евромеханика 6U и кросс-плату, обеспечивающую их совместную работу и расположение в корпусе прибора. Таким образом, аппаратура ПГС включает в себя: модуль коммутации трактов приема и излучения на приемо-передающие антенны, модуль формирования и предварительной обработки сигналов ГА-связи (в т.ч. фильтрации, усиления, АЦП и ЦАП), модуль усилителя мощности сигналов ГА-связи, подаваемых на антенны; вычислительный модуль, который реализует алгоритмы ГА-связи в различных режимах, а также модуль преобразования электропитания. Натурные испытания изготовленной аппаратуры запанированы на осень 2022 г.

**Выводы.** Проведенные в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» работы по созданию гидроакустической аппаратуры связи позволили:

- создать экспериментальный образец АПС СГС, позволяющий отрабатывать технические решения, протоколы информационно-технического взаимодействия абонентов подводной сети, их навигационного обеспечения, накопления телеметрических данных и модели применения, используя пространственное разрешение, а в перспективе — и частотное;
- отработать алгоритмы взаимного позиционирования, включая алгоритмы одномаяковой навигации, а также алгоритмы работы длиннобазовой гидроакустической навигационной системы;
- создать оборудование дальней гидроакустической связи, обеспечивающей в перспективе связь отдельных подсетей ближней сетевой связи.

*Литература*

1. Гайкович Б. А. и др. Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подледных акваториях // Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2018 года. 2018. С. 64–86.
2. К. Г. Кебкал, А. И. Машошин, Н. В. Мороз. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 2 (105). С. 106–135.
3. González-García J/ et. al. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. P. 1256. doi:10.3390/app10041256.
4. Федосов В. П., Тарасов С. П., Воронин В. В., Кучерявенко С. В., Пивнев П. П., Легин А. А., Ломакина А. В., Франц В. А. Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов. Монография. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд. Южного федерального университета, 2018. 178 с.
5. Khalid Mahmood Awan, Peer Azmat Shah, Khalid Iqbal, Saira Gillani, Waqas Ahmad, and Yunyoung Nam. Underwater Wireless Sensor Networks: A Review of Recent Issues and Challenges // Wireless Communications and Mobile Computing. 2019. Vol. Article ID 6470359, 20 p. <https://doi.org/10.1155/2019/6470359>.
6. Munafo A., Ferri G. An Acoustic Network Navigation System // J. of Field Robotics. 2017. Vol. 00(0), P. 1–20. DOI: 10.1002/rob.21714.
7. Кебкал К. Г., Машошин А. И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24, № 3 (94). С. 115–130. DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.3.
8. Захаров Ю. В., Коданев В. П. Экспериментальные исследования акустической системы передачи информации с шумоподобными сигналами // Акуст. журн. 1994. Т. 40, № 5. С. 799–808.
9. Курьянов Б. Ф., Пенкин М. М. Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акуст. журн. 2010. Т. 56, № 2. С. 245–255.
10. Голубев А. Г. Методы повышения эффективности систем цифровой связи с шумоподобными сигналами. СПб.: Буквально. 2019. 317 с.
11. Пелевин А. Е., Скородумов Ю. М., Торопов А. Б., Зайцев О. В., Елисеев Д. П., Лукоянов Е. В., Юхта Е. Д., Поляков Д. Ю., Павлова С. В., Фесенко И. А., Литуненко Е. Г., Варварин С. С. Способ осуществления гидроакустической связи с быстроходным подводным объектом. Патент RU 2 7 3 3 4 8 9 C1. Заявка 2020104824 от 03.02.2020.
12. Торопов А. Б., Лопарев А. В., Пелевин А. Е. Сравнение алгоритмов оценивания местоположения подводного аппарата при одномаяковой навигации // Мат.13 мультиконф. по проблемам управления. 2020.
13. Кошаев Д. А. Многоальтернативный алгоритм одномаяковой навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 1. Математическое описание // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, №2 (109). С. 109–130.

Работа в части моделирования информационно-технического взаимодействия узлов сетевой гидроакустической связи выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-29-00339.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Е. З. Коварская, А. В. Краснов<sup>1</sup>, К. Г. Погудин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, И. Б. Московенко, д-р техн. наук, С. И. Пугачев<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Е. Ю. Рытов<sup>2</sup>, канд. техн. наук

ООО «Звук», Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## DETERMINATION OF PHYSICAL-MECHANICAL AND ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF PIEZOCERAMIC ELEMENTS

E. Z. Kovarskaya, A. V. Krasnov<sup>1</sup>, K. G. Pogudin<sup>1</sup>, Ph.D., I. B. Moskovenko, Dr.Sc., S. I. Pugachev<sup>1</sup>, Dr.Sc., E. Yu. Rytov<sup>2</sup>, Ph.D.

ООО «Zvuk», St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

*Приведены результаты экспериментальных исследований физико-механических параметров пьезокерамических элементов (ПКЭ) из материала системы ЦТС в форме тонкостенных цилиндров (колец) методом собственных колебаний с применением серийно выпускаемых сертифицированных приборов типа «Звук». Полученные результаты сопоставлены с результатами измерения электрофизических параметров ПКЭ стандартным методом резонанса-антирезонанса. Показано, что совместное использование методов расширяет возможности их применения для решения прикладных задач электро- и гидроакустики.*

*The experimental results of determining physical-mechanical parameters of piezoelectric ceramic elements (PCE) from the material of the PZT system in the shape of thin-walled cylinders (of rings) by the acoustic methods based on measuring the natural frequencies using commercially available certified of ZVUK type devices are presented. The results obtained are compared with the results of measuring the electrophysical parameters similar to PCEs using the standard resonance-antiresonance method. It is pointed out that the joint use of the methods expands the possibilities of using PCE for solving applied problems of electroacoustics and hydroacoustics.*

**Определение физико-механических параметров ПКЭ.** В работе [1] анализировались методы определения параметров ПКЭ в форме дисков с различным отношением диаметра к толщине. В настоящей работе исследовали тонкостенные цилиндры (кольца) из материалов ЦТС-19, ЦТБС-3 и ЦТСНВ-1 с наружным диаметром  $D$  (30...74) мм, внутренним диаметром  $d$  (26...66) мм, высотой  $H$  (16...50) мм, с толщиной стенки (2,0...5,0) мм. Размеры конкретных образцов приведены в таблицах результатов измерений. Измерялись и рассчитывались частоты собственных плоских колебаний колец  $f_d$ , Гц; приведенная скорость распространения акустических волн  $C_1$ , м/с; модуль Юнга  $E$ , ГПа, масса  $m$ , кг, и плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>. Использовали акустический метод контроля, основанный на измерении частот собственных колебаний (ЧСК) объектов [2–4]. Измерения выполнялись с помощью измерителя частот собственных колебаний «Звук-203М», в котором реализован метод свободных колебаний, возбуждаемых в изделии ударом. С позиций теории колебаний, в рассматриваемых ПКЭ предпочтительными для регистрации являются низкочастотные колебания типа  $f_d$  — колебания в плоскости цилиндра (кольца), мода с двумя узловыми диаметрами (рис. 1).

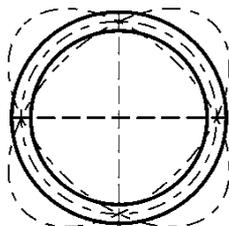


Рис. 1. Форма колебаний объектов на частоте  $f_d$ .

Штрих-пунктир — положение диаметра цилиндра в различные полупериоды колебаний;  
пунктир — положение узловых линий (области, неподвижные при колебаниях).

Выбор колебаний производился в результате анализа спектра частот собственных колебаний тонких цилиндров (колец); скорость  $C_1$  определялась по величине  $f_d$ ; модуль  $E$  определялся из выражения  $C_1 = (E/\rho)^{1/2}$ , где  $\rho$  — плотность. Результаты измерения ЧСК ПКЭ в форме цилиндров шести типоразмеров по пять образцов каждого и расчета  $C_1$  и  $E$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Физико-механические параметры ПКЭ

| Размеры, мм |    |    | Материал | Номер ПКЭ | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $f_r$ , кГц | $C_1$ , м/с | ЗИ* | $C_{1\text{ ср}}$ , м/с | $E$ , ГПа |
|-------------|----|----|----------|-----------|----------------------------|-------------|-------------|-----|-------------------------|-----------|
| D           | H  | d  |          |           |                            |             |             |     |                         |           |
| 30          | 16 | 26 | ЦТС-19   | 1.1       | 7038                       | 42,4        | 3730        | 37  |                         |           |
|             |    |    |          | 1.2       |                            | 42,5        | 3740        | 37  |                         |           |
|             |    |    |          | 1.3       |                            | 42,3        | 3720        | 37  | 3730                    | 97,8      |
|             |    |    |          | 1.4       |                            | 42,1        | 3700        | 37  |                         |           |
|             |    |    |          | 1.5       |                            | 42,7        | 3750        | 37  |                         |           |
| 51          | 13 | 45 | ЦТБС-3   | 2.1       | 7099                       | 20,6        | 3110        | 31  |                         |           |
|             |    |    |          | 2.2       |                            | 20,7        | 3120        | 31  |                         |           |
|             |    |    |          | 2.3       |                            | 20,7        | 3120        | 31  | 3115                    | 68,8      |
|             |    |    |          | 2.4       |                            | 20,6        | 3100        | 31  |                         |           |
|             |    |    |          | 2.5       |                            | 20,7        | 3120        | 31  |                         |           |
| 61          | 23 | 51 | ЦТБС-3   | 3.1       | 7123                       | 20,5        | 3610        | 37  |                         |           |
|             |    |    |          | 3.2       |                            | 20,4        | 3590        | 35  |                         |           |
|             |    |    |          | 3.3       |                            | 20,6        | 3620        | 37  | 3600                    | 92,2      |
|             |    |    |          | 3.4       |                            | 20,6        | 3620        | 37  |                         |           |
|             |    |    |          | 3.5       |                            | 20,2        | 3550        | 35  |                         |           |
| 74          | 21 | 64 | ЦТСНВ-1  | 4.1       | 7237                       | 13,6        | 2940        | 29  |                         |           |
|             |    |    |          | 4.2       |                            | 13,6        | 2940        | 29  |                         |           |
|             |    |    |          | 4.4       |                            | 13,5        | 2920        | 29  | 2950                    | 62,9      |
|             |    |    |          | 4.7       |                            | 13,6        | 2950        | 29  |                         |           |
|             |    |    |          | 4.8       |                            | 13,8        | 2990        | 29  |                         |           |
| 74          | 32 | 66 | ЦТБС-3   | 5.1       | 7076                       | 17,2        | 3780        | 37  |                         |           |
|             |    |    |          | 5.2       |                            | 17,5        | 3850        | 39  |                         |           |
|             |    |    |          | 5.3       |                            | 17,6        | 3870        | 39  | 3820                    | 103,2     |
|             |    |    |          | 5.5       |                            | 17,2        | 3770        | 37  |                         |           |
|             |    |    |          | 5.7       |                            | 17,4        | 3820        | 39  |                         |           |
| 74          | 50 | 66 | ЦТБС-3   | 6.1       | 7002                       | 17,4        | 3820        | 39  |                         |           |
|             |    |    |          | 6.2       |                            | 17,5        | 3840        | 39  |                         |           |
|             |    |    |          | 6.3       |                            | 17,2        | 3790        | 37  | 3820                    | 102,2     |
|             |    |    |          | 6.4       |                            | 17,5        | 3840        | 39  |                         |           |
|             |    |    |          | 6.5       |                            | 17,3        | 3810        | 39  |                         |           |

\*) Звуковой индекс [1, 4]

**Определение электрофизических параметров ПКЭ.** Согласно обоснованию, приведенному в работе [1], электрофизические параметры ПКЭ приведенных выше типоразмеров определяли методом резонанса-антирезонанса [5–7]. Результаты соответствующих измерений и расчетов параметров ПКЭ приведены в табл. 2.

## Электрофизические параметры ПКЭ

| Размеры, мм |    |    | Материал | Номер ПКЭ | Ср, нФ | tgδ, % | ρ, кг/м <sup>3</sup> | fр, кГц | fа, кГц | Δfр, кГц | d <sub>31</sub> *10 <sup>11</sup> , Кл/Н | С <sub>1</sub> , м/с | С <sub>1</sub> ср, м/с |
|-------------|----|----|----------|-----------|--------|--------|----------------------|---------|---------|----------|------------------------------------------|----------------------|------------------------|
| D           | H  | d  |          |           |        |        |                      |         |         |          |                                          |                      |                        |
| 30          | 16 | 26 | ЦТС-19   | 1.1       | 12,55  | 0,3    | 7038                 | 40,6    | 42,4    | 1,8      | 130,2                                    | 3723                 | 3703                   |
|             |    |    |          | 1.2       | 12,80  | 0,3    |                      | 40,5    | 42,2    | 1,7      | 131,4                                    | 3710                 |                        |
|             |    |    |          | 1.3       | 12,61  | 0,3    |                      | 40,7    | 42,2    | 1,5      | 124,2                                    | 3712                 |                        |
|             |    |    |          | 1.4       | 13,32  | 0,3    |                      | 39,8    | 41,6    | 1,8      | 142,4                                    | 3658                 |                        |
|             |    |    |          | 1.5       | 12,62  | 0,3    |                      | 40,5    | 42,2    | 1,7      | 130,7                                    | 3713                 |                        |
| 51          | 13 | 45 | ЦТБС-3   | 2.1       | 11,68  | 0,6    | 7099                 | 20,13   | 21,22   | 1,1      | 178,5                                    | 3198                 | 3207                   |
|             |    |    |          | 2.2       | 11,72  | 0,6    |                      | 20,14   | 21,23   | 1,1      | 180,2                                    | 3200                 |                        |
|             |    |    |          | 2.3       | 12,14  | 0,6    |                      | 20,09   | 21,23   | 1,1      | 183,6                                    | 3200                 |                        |
|             |    |    |          | 2.4       | 12,22  | 0,6    |                      | 20,20   | 21,33   | 1,1      | 186,3                                    | 3215                 |                        |
|             |    |    |          | 2.5       | 11,43  | 0,6    |                      | 20,22   | 21,38   | 1,2      | 183,4                                    | 3222                 |                        |
| 61          | 23 | 51 | ЦТБС-3   | 3.1       | 18,51  | 0,3    | 7123                 | 19,46   | 20,31   | 0,8      | 155,0                                    | 3571                 | 3600                   |
|             |    |    |          | 3.2       | 18,66  | 0,4    |                      | 19,40   | 20,53   | 1,1      | 180,3                                    | 3610                 |                        |
|             |    |    |          | 3.3       | 18,12  | 0,3    |                      | 19,51   | 20,70   | 1,2      | 180,7                                    | 3640                 |                        |
|             |    |    |          | 3.4       | 18,11  | 0,3    |                      | 19,52   | 20,64   | 1,1      | 175,2                                    | 3629                 |                        |
|             |    |    |          | 3.5       | 18,33  | 0,4    |                      | 19,36   | 20,18   | 0,8      | 152,7                                    | 3548                 |                        |
| 74          | 21 | 64 | ЦТСНВ-1  | 4.1       | 13,78  | 1,2    | 7237                 | 13,2    | 13,8    | 0,6      | 147,0                                    | 2973                 | 2930                   |
|             |    |    |          | 4.2       | 13,94  | 1,2    |                      | 13,2    | 13,7    | 0,6      | 147,2                                    | 2975                 |                        |
|             |    |    |          | 4.3       | 11,98  | 1,4    |                      | 12,6    | 13,0    | 0,4      | 131,7                                    | 2816                 |                        |
|             |    |    |          | 4.4       | 13,62  | 1,3    |                      | 13,1    | 13,7    | 0,5      | 146,2                                    | 2966                 |                        |
|             |    |    |          | 4.5       | 13,18  | 1,3    |                      | 13,0    | 13,5    | 0,5      | 143,1                                    | 2920                 |                        |
| 74          | 32 | 66 | ЦТБС-3   | 5.1       | 30,37  | 0,6    | 7076                 | 16,3    | 17,0    | 0,7      | 123,8                                    | 3732                 | 3812                   |
|             |    |    |          | 5.2       | 26,86  | 0,6    |                      | 16,8    | 17,5    | 0,7      | 115,7                                    | 3854                 |                        |
|             |    |    |          | 5.3       | 26,29  | 0,6    |                      | 16,8    | 17,5    | 0,7      | 117,3                                    | 3847                 |                        |
|             |    |    |          | 5.4       | 26,27  | 0,5    |                      | 16,7    | 17,6    | 0,8      | 123,8                                    | 3866                 |                        |
|             |    |    |          | 5.5       | 28,91  | 0,6    |                      | 16,4    | 17,1    | 0,7      | 122,2                                    | 3759                 |                        |
| 74          | 50 | 66 | ЦТБС-3   | 6.1       | 45,23  | 0,6    | 7002                 | 16,1    | 16,7    | 0,6      | 118,9                                    | 3672                 | 3665                   |
|             |    |    |          | 6.2       | 43,81  | 0,6    |                      | 16,2    | 16,8    | 0,6      | 117,2                                    | 3689                 |                        |
|             |    |    |          | 6.3       | 47,43  | 0,6    |                      | 15,9    | 16,5    | 0,6      | 121,5                                    | 3629                 |                        |
|             |    |    |          | 6.4       | 44,96  | 0,6    |                      | 16,2    | 16,8    | 0,6      | 117,9                                    | 3683                 |                        |
|             |    |    |          | 6.5       | 46,64  | 0,6    |                      | 16,0    | 16,6    | 0,6      | 118,9                                    | 3654                 |                        |

На рис. 2 и 3 дано сопоставление результатов акустического контроля ПКЭ прибором «Звук-203М» и определения плотности на пяти ПКЭ каждого типоразмера, а также результатов определения скорости С<sub>1</sub> (Звук-203М) и С<sub>1</sub> (установка «Цензурка М»).

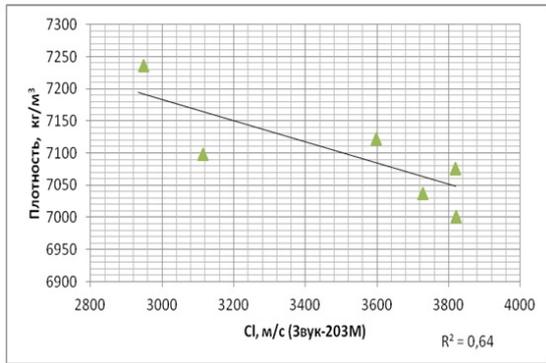


Рис. 2. Сопоставление плотности ПКЭ и скорости звука.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

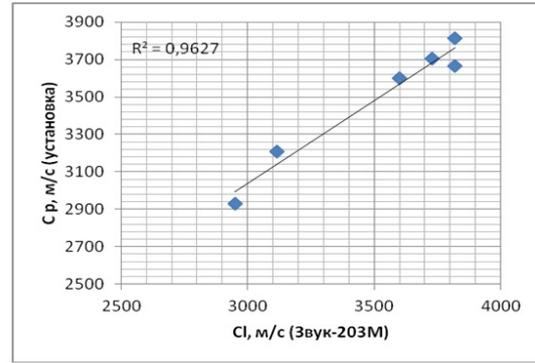


Рис. 3. Сопоставление скорости звука, измеренной различными методами.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Представленные результаты определения скорости  $C_1$  (Звук-203М) и  $C_1^e$  (установка «Цензурка М», на рис. 3 обозначена  $C_p$ ) демонстрируют хорошее совпадение (коэффициент корреляции  $R=0,98$ ), т.е. эту величину можно определять любым из двух способов. Наличие достаточно надежной корреляции ( $R=0,80$ ) между плотностью и скоростью  $C_1$  (Звук-203М) для образцов рассматриваемых материалов (см. рис. 3) также может быть использовано для оперативной оценки плотности по результатам акустических измерений.

Сочетание различных методов определения физико-механических характеристик может быть использовано для оптимизации выполнения исследований и определения характеристик пьезокерамического материала и качества ПКЭ в форме тонкостенных цилиндров.

#### Литература

1. Коварская Е. З., Краснов А. В. и др. Определение физико-механических и электрофизических параметров пьезокерамических элементов // Тр. Всеросс. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.:2020. С. 523–528.
2. Глаговский Б. А., Московенко И. Б. Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1977. 208 с.
3. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967. 444 с.
4. ГОСТ Р52710-2007 «ИНСТРУМЕНТ АБРАЗИВНЫЙ. Акустический метод определения твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн».
5. Пьезокерамические преобразователи // Справочник / Под ред. С. И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
6. Головнин В. А., Каплунов И. А. и др. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов. М.: Техносфера, 2013. 272 с.
7. Материалы пьезокерамические. Технические условия. ОСТ П 0444-87. М.: 1987. 144 с.

## ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ СТЕРЖНЕВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОНИЖЕННОЙ ВИБРОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

*И. И. Стырикович*, канд. техн. наук

АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

## ON A MODEL OF THE BAR UNDERWATER PIEZOCERAMIC TRANSDUCER WITH REDUCED VIBRATION SENSITIVITY

*I. I. Styrikovich*, Ph.D.

JSC «Concern «Sea Underwater Weapon – Gidropribor», St. Petersburg, Russia

*Рассматриваются колебания стержневого гидроакустического пьезопреобразователя силового типа с частичной разгрузкой от гидростатического давления при возбуждении вибрации через элементы крепления. Проведена оценка виброчувствительности пьезопреобразователя в широкой полосе частот.*

*The paper examines vibrations of the underwater piezoceramic bar transducer of load-bearing type with partial compensation of the hydrostatic pressure when the vibration has been imparted via the mounting parts. An estimation of vibration sensitivity of the piezoceramic transducer in the wide band is given.*

При проектировании стержневых пьезокерамических преобразователей (ПП) их колебательная система может быть представлена, в зависимости от решаемых задач, любой моделью, от простейших одномерных моделей до двумерных либо трехмерных моделей, которые рассчитываются с использованием численных методов [1]. Несмотря на то, что одномерное приближение предполагает наличие только продольных колебаний конструктивных элементов ПП, оно позволяет производить расчёты основных характеристик в широкой полосе частот, и в частности, чувствительность конструкции к вибрации, передающейся через элементы крепления.

Ранее в работах [1,2] при рассмотрении вопросов построения колебательных систем высокоэффективных ПП устойчивых к вибрации было показано, что наиболее перспективными с точки зрения удовлетворения совокупности требований, предъявляемых к ПП работающим в составе гидроакустических антенных устройств, является конструкция силового типа с частичной разгрузкой от гидростатического давления. Вариант такой конструкции с креплением в узловом сечении элементов армирования представлен на рис. 1. На рис. 1 используются следующие обозначения: ОК — корпусная опора; КС — крепежный стержень;  $m$  — тыльная накладка;  $a_m$  — тыльная часть элемента армирования;  $a_n$  — часть элемента армирования, прилегающая к рабочей накладке;  $l$  — пьезокерамическая секция;  $n$  — рабочая накладка.

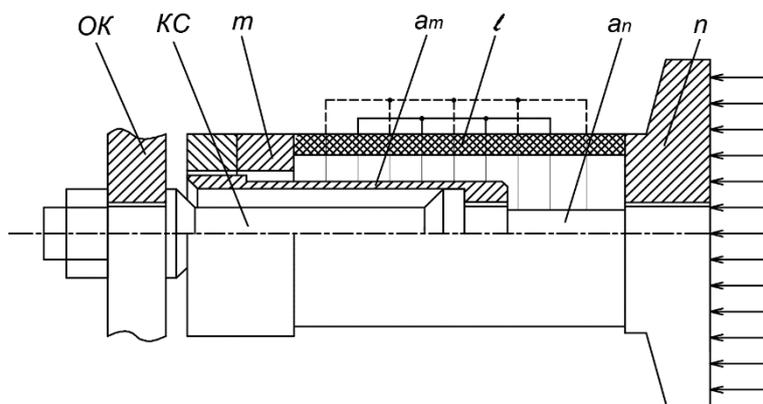


Рис. 1. Конструктивная схема пьезопреобразователя силового типа с частичной разгрузкой от гидростатического давления.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Вывод основных расчетных соотношений для одномерной модели такого ПП был выполнен на основе решения системы уравнений, описывающих колебания ПП с учетом граничных условий [3]. Для нахождения виброчувствительности  $\gamma_W$  ПП, исходя из её определения, как отношения электрического напряжения на выходе  $U_m$  к воздействию вибрации опорной конструкции  $\omega V_0$ , заданной в сечении закрепления —  $\gamma_W = U_m / \omega V_0$ , искомое значение  $U_m$  непосредственно определялось через амплитуды колебательных скоростей  $V_m = i\omega \xi_m$ ,  $V_n = i\omega \xi_n$  (смещений) на торцах активного пьезокерамического стержня (пьезосекции):

$$U_m = i\omega \frac{d_{33} S_l (\xi_n - \xi_m)}{S_{33}^E d_{эл} Y_n - i\omega C_0}, \quad (1)$$

где  $d_{33}$  — пьезоэлектрический модуль;  $S_{33}^E$  — постоянная гибкости при постоянном электрическом поле;  $S_l$  — площадь поперечного сечения пьезосекции;  $d_{эл}$  — расстояние между электродами;  $Y_n$  — проводимость внешней нагрузки;  $C_0$  — электрическая ёмкость;  $\xi_n, \xi_m$  — амплитуды смещения соответствующих торцов пьезосекции.

В общем виде выражения для  $V_m, V_n$  весьма громоздки для анализа. Для симметричной колебательной системы ПП эти выражения могут быть представлены в виде:

$$V_m = \frac{iV_0 \frac{Z_a}{\sin X_a} (Z_a \operatorname{ctg} X_a + Z_l \operatorname{ctg} \frac{X_l}{2} - Z_n \operatorname{tg} X_n + iR_H)}{D_1 + iD_2}; \quad (2)$$

$$V_n = \frac{iV_0 \frac{Z_a}{\sin X_a} (Z_a \operatorname{ctg} X_a + Z_l \operatorname{ctg} \frac{X_l}{2} - Z_n \operatorname{tg} X_n)}{D_1 + iD_2},$$

где  $D_1 = R_H (Z_n \operatorname{tg} X_n - Z_a \operatorname{ctg} X_a - Z_l \operatorname{ctg} X_l)$ ;

$D_2 = Z_a^2 \operatorname{ctg} X_a + 2Z_l Z_a \operatorname{ctg} X_l \operatorname{ctg} X_a - 2Z_n \operatorname{tg} X_n (Z_a \operatorname{ctg} X_a + Z_l \operatorname{ctg} X_l) + Z_n^2 \operatorname{tg}^2 X_n - Z_l^2$ ;

$Z_m, Z_n, Z_a$  — импедансы соответствующих элементов;  $X_m, X_n, X_a$  — волновые размеры соответствующих элементов;  $R_H$  — сопротивление нагрузки.

Условие резонанса можно получить, приравняв к нулю мнимую часть знаменателя в выражениях (2). Преобразовав выражения для мнимой части знаменателя, получим:

$$D_2 = (Z_n \operatorname{tg} X_n - Z_a \operatorname{ctg} X_a + Z_l \operatorname{tg} \frac{X_l}{2})(Z_n \operatorname{tg} X_n - Z_a \operatorname{ctg} X_a - Z_l \operatorname{ctg} \frac{X_l}{2}). \quad (3)$$

Условие равенства нулю первого сомножителя определяет резонанс четной формы колебаний ПП при воздействии вибрации. Условие равенства нулю второго сомножителя определяет резонанс нечетной формы колебаний ПП, частота которого  $f_1$  совпадает с основной частотой колебаний стержневого ПП при возбуждении в режиме приема звуковым давлением. В отличие от обычного возбуждения одностороннего ПП в режиме излучения или режиме приёма со стороны рабочей накладке, когда в ПП чётные формы колебаний не возбуждаются, в случае возбуждения ПП вибрацией через элементы крепления эффективными оказываются как нечетные, так и четные формы колебаний. Как показано ранее [2, 3], в ПП возбуждаемом в узлом сечении элемента армирования виброчувствительность  $\gamma_w$  на основной резонансной частоте  $f_1$ , происходит частичная компенсация вибросигнала, когда части пьезосекции испытывают механические деформации разных знаков, в отличие от обычного распределения по закону  $\cos x$  при работе ПП на резонансе в режиме излучения или приёма звукового давления. Проведенные на основе полученных выражений расчеты показывают, что на резонансной частоте четной формы  $f_2 = 2 f_1$  по длине ПП укладывается две полуволны, а величины виброчувствительности ПП на резонансах четных форм колебаний значительно превышают значение на частоте основного резонанса  $f_1$ . Качественно частотная зависимость (АЧХ) виброчувствительности ПП в широкой полосе частот выглядит, как показано на рис. 2.

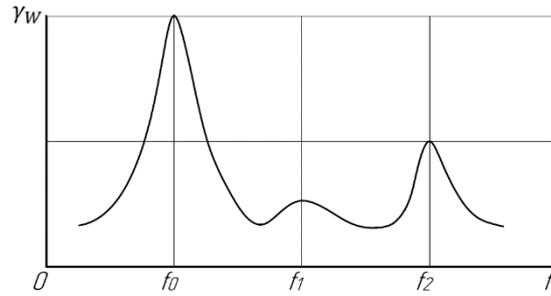


Рис. 2. Вид АЧХ виброчувствительности ПП.  
Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Обращает на себя внимание резонанс в области низких частот на частоте  $f_0$ . Как показывают дополнительные расчеты, выполненные численным методом МКЭ, в области низких частот ПП представляет собой простую колебательную систему, элементы которой могут быть описаны в терминах сосредоточенной массы ПП, колеблющегося как единое целое, и эквивалентной упругости его элементов крепления.

Проведенный в работе анализ указывает на присутствие добавочной чётной формы колебаний при возбуждении ПП вибрацией через элементы его крепления. Появляющиеся дополнительные резонансы могут располагаться в рабочей полосе частот приёма, что следует учитывать при проектировании широкополосных ПП.

#### *Литература*

1. Стырикович И. И. Комплексный анализ колебательных систем стержневых пьезокерамических преобразователей гидроакустических антенн // Подводное морское оружие. 2021. № 4(58). С. 59–69.
2. Белов Б. П., Дмитриченко В. П., Добисова Л. В., Масленникова Л. Н. Стырикович И. И. Виброчувствительность резонансных стержневых армированных пьезопреобразователей при различных способах возбуждения в конструкции // Вопросы кораблестроения. Сер. «Спецгидроакустика». 1980. № 33, С. 136–140.
3. Стырикович И. И., Иванова А. В. Некоторые особенности проектирования стержневых пьезокерамических преобразователей антенных устройств морского подводного оружия // Тр. XIII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб. 2016. С. 433–436.

## ЦИФРОВЫЕ И АНАЛОГОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ОБЪЕМНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

Е. Е. Леоненко, К. А. Румянцев, Т. В. Храброва

АО «Морские неакустические комплексы и системы», Санкт-Петербург, Россия

## DIGITAL AND ANALOG RECEIVERS FOR VOLUMETRIC REVERBERATION SIGNALS REGISTRATION

E. E. Leonenko, K. A. Rumyantsev, T. V. Khrabrova

JSC «Marine Non-acoustic Complexes and Systems», St. Petersburg, Russia

*Рассмотрены аналоговые и цифровые способы обработки сигналов объемной реверберации. Приведены формы экспериментальных сигналов объемной реверберации, записанных в условиях акустического бассейна. Приведены результаты обработки экспериментальных сигналов различными программными и аппаратными средствами.*

*Analog and digital means of signal processing of volumetric reverberation signals are considered. Experimental data of volumetric reverberation signals recorded in acoustic basin are presented. Results for software and hardware signal processing are presented.*

**Введение.** Эффект объемной реверберации в океане — это явление, вызванное рассеянием звука взвешенными примесями, микроорганизмами, а также рыбами. Реверберация может рассматриваться как помеха работе гидролокатора [1], так и как полезный сигнал, который можно использовать для изучения особенностей стратификации водной среды и ее биоразнообразия [2]. В качестве приемо-передающего устройства может быть использована антенна судового эхолота с существующим трактом формирования зондирующих импульсов и специальным трактом приема и обработки сигналов объемной реверберации. Для разработки приемника сигналов реверберации необходимо оценить ожидаемый уровень сигнала, определяемый акустическими характеристиками как среды, так и антенны. В соответствии с [1] уровень сигнала объемной реверберации УР, дБ определяется по формуле:

$$УР = 10 \lg \left( \frac{I_0}{r^4} S_v \frac{c\tau}{2} \psi r^2 \right), \quad (1)$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения, приведенная к расстоянию 1 м от излучателя, Вт/м<sup>2</sup>;  $r$  — расстояние от излучателя до рассеивающего объема, м;  $S_v$  — сила обратного рассеяния для объемной реверберации, и равная отношению интенсивности, отраженной от рассеивающего объема волны к интенсивности падающей волны;  $c$  — скорость звука в среде, м/с;  $\tau$  — длительность излученного импульса, с;  $\psi$  — телесный угол раскрытия эквивалентной характеристики направленности излучателя, определяемый в общем случае как интеграл произведения характеристик направленности антенны в режиме излучения и приема:

$$\int_0^{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} b(\theta, \varphi) b'(\theta, \varphi) \cos \theta \, d\theta \, d\varphi, \quad (2)$$

где  $b = b(\theta, \varphi)$  — характеристика направленности антенны в режиме излучения;  $b'(\theta, \varphi)$  — характеристика направленности антенны в режиме приема;

В случае круглой плоской антенны (наиболее распространенная форма для эхолотов) в жестком экране (граничные условия, соответствующие установке в корпусе судна) характеристика направленности определяется по формуле [1]:

$$b(\theta) = \frac{2J_1(\pi D/\lambda \sin \theta)}{\pi D/\lambda \sin \theta}, \quad (3)$$

где  $D$  — диаметр антенны, м;  $J_1$  — функция Бесселя 1-го рода;  $\lambda$  — длина волны в воде.

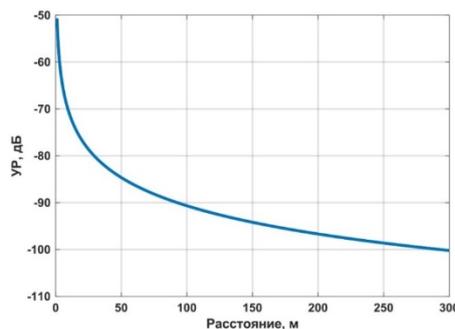


Рис. 1. Зависимость уровня реверберации на входе приемника для зондирующего импульса длительностью 1 мс и волновых размеров антенны  $D\lambda = 0,026$ .

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

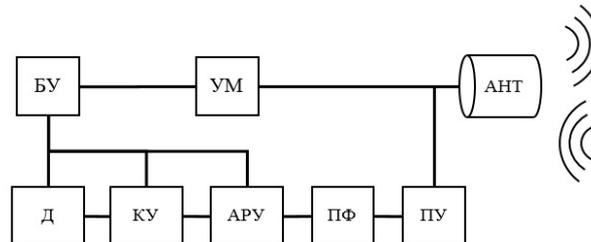


Рис. 2. Блок-схема типовой тракта эхолота.

Основной характеристикой среды, помимо скорости звука, определяющей УР, является сила обратного рассеяния  $S_v$ . Согласно [1] она составляет величину порядка  $-80$  дБ. Оценим предполагаемый УР при использовании типовой антенны эхолота. На рис. 1 приведена зависимость УР от расстояния для короткого (1 мс) импульса, излученного на частоте 100 кГц, рассчитанная с использованием формул (1)–(3).

**Аналоговые и цифровые тракты обработки сигналов.** Из рис. 1 видно, что УР имеет изначально достаточно низкий уровень, сопоставимый с уровнем шумов моря и быстро снижается с ростом расстояния от антенны до рассеивающего объема. Таким образом приемник реверберационных сигналов должен отличаться низким уровнем приведенных ко входу шумов, и хорошей частотной избирательностью. На рис. 2 приведена блок-схема типовой тракта приема и излучения сигналов эхолота. На рис. 2 обозначены следующие элементы тракта: блок управления (БУ) формирующий зондирующие импульсы, команды управления и содержащий аналого-цифровой преобразователь (АЦП) эхо-сигнала, предварительно обработанного другими блоками; блок усилителя мощности (УМ), усиливающий сформированные блоком БУ импульсы для последующего излучения антенным устройством (АНТ); блок предварительного усилителя (ПУ), согласовывающий выход антенны с последующими элементами приемного тракта; блок полосового фильтра (ПФ) выделяет из спектра принятого сигнала полосу рабочей частоты эхолота; блок автоматического регулируемого усиления (АРУ) компенсирует пространственно-временное изменение уровня сигнала (снижение амплитуды сигнала при расширении волнового фронта); блок коммутуруемого усилителя (КУ) производит дополнительное усиление сигнала для согласования динамических диапазонов сигнала и АЦП блока БУ; блок детектирования Д осуществляет выделение огибающей эхо сигнала для последующего преобразования ее с помощью АЦП блока БУ. Следует отметить, что типовая схема эхолота, приведенная на рис. 2, может быть использована для регистрации сигналов объемной реверберации лишь в части формирования зондирующих сигналов. Ввиду малого уровня сигнала целесообразно производить оцифровку принятого сигнала без его предварительной обработки аналоговыми цепями [3] (фильтрация, выделение огибающей). В то же время необходимо убедиться, что динамический диапазон сигнала реверберации соответствует динамическому диапазону используемого аналого-цифрового преобразователя, а также отсутствуют эффекты альясинга (перенос высокочастотных шумов в рабочую полосу при дискретизации сигнала). Для

соблюдения данных требований целесообразно применить в составе приемного тракта маломощный предварительный усилитель-коммутатор, обеспечивающий согласование источника сигнала с трактом. Также необходимо использовать антиальсинговый фильтр. После дискретизации сигнала дальнейшая обработка выполняется в цифровом виде. На рис. 3 приведена блок-схема алгоритма фильтрации принятого сигнала и выделения огибающей. На рис. 3 обозначены следующие элементы цифрового тракта: полосовой фильтр (ПФ) выполняющий выделение несущей частоты; фильтр Гильберта (ФГ) реализующий преобразование Гильберта с помощью цифрового фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ); линия задержки (ЛЗ) компенсирующая задержку сигнала при цифровой фильтрации КИХ фильтром; вычисление модуля сигнала ( $|abs|$ ); сумматор (+); фильтр нижних частот (ФНЧ) удаляющий из спектра сформированной огибающей компоненты несущей частоты.

**Экспериментальные результаты.** Для сравнительного анализа аналогового и цифрового приемного трактов была проведена синхронная запись сигналов объемной реверберации в акустическом бассейне. В качестве источника зондирующих импульсов использовалась антенна промерного эхолота. Реверберация в бассейне обеспечивалась подачей насыщенной воздушными пузырьками струи воды. На рис. 4 приведена панорама эхо-сигналов (огибающая).

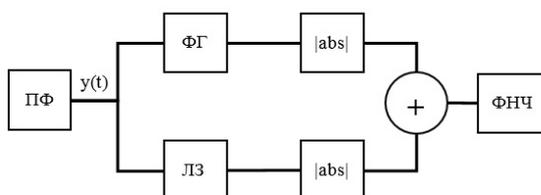


Рис. 3. Блок-схема алгоритма цифровой обработки сигнала объемной реверберации.

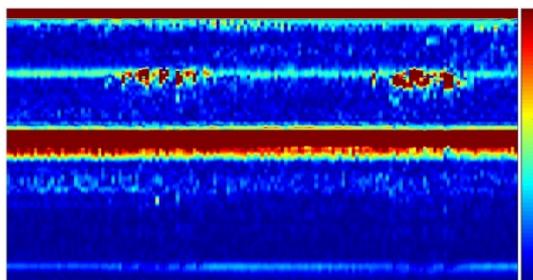


Рис. 4. Панорама эхо-сигналов в бассейне.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

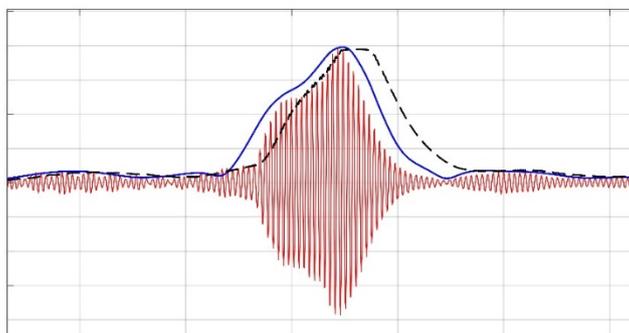


Рис. 5. Эхо-сигнал объемной реверберации (однократная реализация).

Красным цветом показан сигнал несущей частоты; черным цветом, пунктиром показана огибающая сигнала сформированная типовым трактом; синим цветом, сплошной линией показана огибающая сформированная цифровым алгоритмом.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

На рис. 4 красная полоса в верхней части сформирована излученным импульсом. Вторая красная полоса в средней части панорамы сформирована эхо сигналом от стенки бассейна. Между указанными красными полосами расположена узкая полоса зеленого цвета, сформированная реверберацией от неоднородности (струи воды) с переменной интенсивностью (красному цвету соответствует наибольшая интенсивность, синему цвету — наименьшая).

На рис. 5 приведены фрагменты огибающих сигналов реверберации, сформированные приемным трактом, собранным по схеме, представленной ранее на рис. 2 и предложенным на рис. 3 алгоритмом.

**Выводы.** Из рис. 5 видно, что огибающая сформированная аналоговым трактом в целом повторяя форму эхо импульса, повторяет задний фронт с некоторым запаздыванием, что обусловлено постоянной времени аналогового тракта. Огибающая, сформированная цифровым трактом не имеет данной особенности. Также следует отметить, что алгоритм цифрового формирования огибающей может быть параметризован, с последующей адаптацией параметров к конкретным условиям работы (уровни реверберации, условия распространения и т.п.).

#### *Литература*

1. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Ленинград: Судостроение, 1978.
2. Клей Г. М. Акустическая океанография. М.: Мир, 1980.
3. Digital Envelope Detection: The Good, the Bad, and the Ugly [Электронный ресурс] // DSPRelated.com: [сайт]. [2016]. URL: <https://www.dsprelated.com/showarticle/938.php>
4. Смартышев М. Д. Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973.

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЬ–ТВЁРДОЕ ТЕЛО

Ф. Ф. Легуша, д-р физ.-мат. наук, К. Н. Пялов<sup>1</sup>, Г. В. Чижов<sup>2</sup>

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

<sup>1</sup>АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>АО «СПМБМ «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

## THE INFLUENCE OF THE ACOUSTIC BOUNDARY LAYER FORMATION PROCESS ON THE PARAMETERS OF THE SOUND WAVE INTERACTING WITH THE LIQUID-SOLID INTERFACE

F. F. Legusha, Dr.Sc., K. N. Pialov<sup>1</sup>, G. V. Chizhov<sup>2</sup>

Saint Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin», St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>JSC «Saint Petersburg Marine Design Bureau «Malachite», St. Petersburg, Russia

*В работе анализируется влияние акустического пограничного слоя, возбуждаемого на поверхности твёрдого тела звуковой волны, на величину коэффициентов: отражения, прохождения и поглощения звука. Численный анализ проведён для границы раздела вода-нержавеющая сталь. В диапазоне углов падения от 0 до угла полного внутреннего отражения волны  $\theta_{кр}$ , отражение, прохождение и поглощение волны в основном обеспечивается акустической прозрачностью поверхности твёрдого тела. При  $\theta > \theta_{кр}$ , значение коэффициента поглощения увеличивается по мере увеличения угла падения волны и при угле  $\theta_m$  наблюдается максимум коэффициента поглощения.*

*In the article the influence of an acoustic boundary layer excited on the surface of a solid body of a sound wave on the magnitude of the coefficients is analysed: reflection, transmission and absorption of sound. Numerical analysis was carried out for the water-stainless steel interface. In the range of incidence angles from 0 to the angle of total internal reflection of the wave, the reflection, passage and absorption of the wave is mainly provided by the acoustic transparency of the solid surface. At  $\theta > \theta_{cr}$ , the value of the absorption coefficient increases as the angle of incidence of the wave increases, and at the angle  $\theta_m$ , the maximum of the absorption coefficient is observed.*

Задача о диссипации энергии звуковой волны на плоской границе раздела жидких сред, имеющих произвольные наборы реальных акустических и термодинамических параметров, впервые была рассмотрена в статьях [1–3]. В настоящее время проведены исследования, посвященные дальнейшему развитию решения этой задачи. Прежде всего, это связано с изучением физических процессов, которые не были рассмотрены раньше, и выяснением их влияния на свойства акустического пограничного слоя (АПС) поверхности раздела сред. Изменена также методика расчёта коэффициентов отражения и прохождения звуковой волны через границу раздела сред. В первую очередь эти изменения связаны с предположением о том, что процессы отражения и преломления звуковой волны на границе раздела сред протекают независимо от физического процесса формирования АПС на этой границе.

Результаты решения этой задачи обобщены на случай взаимодействия бегущей звуковой волны, распространяющейся в жидкости, с плоской бесконечной поверхностью твёрдого тела. Основной задачей этого исследования показать, что формирование АПС вблизи поверхности твёрдого тела приводит к появлению дополнительного процесса диссипации акустической энергии. Коэффициенты отражения и прохождения звуковой волны становятся комплексными, что приводит к появлению дополнительных сдвигов фаз в отраженной и преломлённой волнах.

В случае, когда звуковая волна, распространяющаяся в жидкости, отражается от плоской поверхности твёрдого тела, выражение для расчёта комплексного коэффициента отражения волны по давлению имеет вид

$$R_p = \frac{1 - X_1 - (1 + i)M}{1 + X_1 + (1 + i)M}. \quad (1)$$

Здесь

$$M = \frac{b_{11}k_{T1} + b_{12}k_{V1} \sin^2 \theta_1}{\cos \theta_1}; \quad b_{11} = \sqrt{\frac{\omega a_1}{2c_1^2}} (\Gamma_1 - 1); \quad b_{12} = \sqrt{\frac{\omega v_1}{2c_1^2}}; \quad k_{T1} = \frac{\left(1 + \frac{\rho_1 C_{P1} \beta_{V2}}{\rho_2 C_{P2} \beta_{V1}} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}\right) \left(1 + \frac{(\Gamma_2 - 1) \beta_{V1} c_1}{(\Gamma_1 - 1) \beta_{V2} c_2}\right)}{1 - \sqrt{\frac{\rho_1 C_{P1} \chi_1}{\rho_2 C_{P2} \chi_2}}};$$

$$k_{V1} = 1 + \frac{\rho_1}{\rho_2}; \quad X_1 = Z_1/Z_2.$$

Выше приняты следующие обозначения:  $Z_1 = \rho c / \cos \theta$ ,  $Z_2 = \rho_2 c_2 / \cos \theta_2$  — акустические импедансы контактирующих сред;  $\rho$  — плотность;  $c$  — скорость звука;  $\Gamma$  — нелинейный параметр;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $\chi$  — коэффициент теплопроводности;  $C_p$  — удельная теплоёмкость вещества при постоянном давлении;  $v$  — коэффициент кинематической вязкости;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости;  $\beta_v$  — температурный коэффициент объёмного расширения;  $\theta$  — угол падения;  $\theta_2$  — угол преломления волны. Физические параметры первой — жидкой среды имеют нижний индекс — 1, а параметрам второй среды (твёрдое тело) присвоен нижний индекс — 2. В соответствии с определением коэффициента поглощения, его величину можно рассчитать, если воспользоваться известным выражением

$$D = 1 - |R_p|^2, \quad (2)$$

где  $R_p$  — комплексный коэффициент отражения звуковой волны по давлению (1).

При необходимости могут быть также рассчитаны коэффициент прохождения волны  $B$  по давлению и фазовые сдвиги между падающей и отражённой волнами  $\beta_R$ , а также между падающей и прошедшей волнами  $\beta_V$ . Рассмотрим применение разработанной выше теории для расчёта параметров акустического поля, возникающего в результате взаимодействия бегущей в жидкости звуковой волны с плоской бесконечной поверхностью твёрдого тела. Для примера рассмотрим случай, когда звуковая волна распространяется в пресной воде и отражается от плоской поверхности твёрдого тела, имеющего физические параметры нержавеющей стали 12Х8Н10Т. В судостроении эта сталь широко применяется для создания различных конструктивных элементов. Верхнее полупространство заполнено пресной водой (статические температура  $T_0 = 291$  К (18°C) и давление  $P_0 = 1,0$  атм). Для расчёта частотных и угловых зависимостей модуля коэффициента отражения звукового давления  $R_p$  использовалось выражение (1). Расчётный комплекс  $M$  учитывает диссипацию энергии в АПС. Прежде всего, рассмотрим результаты расчётов частотной зависимости модуля  $R_p$  при нормальном падении звуковой волны на поверхность раздела сред (см. рис. 1;  $\theta = 0$ ). Отметим, что при  $\theta = 0$  форма записи расчётного комплекса  $M$ , входящего в выражение (1), упрощается и принимает вид  $M = b_{1T}$ . Результаты расчёта частотной зависимости модуля  $R_p$  показаны на рис. 1. Здесь же представлено классическое значение коэффициента отражения звука от поверхности стали  $R_{p0} = 0,928$ . Нетрудно заметить, что возбуждение АПС вблизи поверхности твёрдого тела приводит к уменьшению величины модуля  $R_p$  с ростом частоты. Это является следствием увеличения диссипации энергии в АПС при увеличении частоты звуковой волны. На всех частотах выполняется неравенство  $R_{p0} > |R_p|$ .

Частотная зависимость коэффициента поглощения  $D$  для случая  $\theta = 0$  показана на рис. 2. В результате возбуждения АПС вблизи отражающей поверхности тела появляется дополнительное поглощения звука  $D - D_0$ . Эта разность растёт пропорционально  $\sqrt{f}$ . Классический коэффициент поглощения  $D_0 = 0,137$ . Из графика, представленного на рис. 2, нетрудно заметить, что при  $\theta = 0$  поглощение звука, обусловленное диссипацией энергии в АПС, невелико. Это связано с тем обстоятельством, что в рассматриваемом случае функция  $M$ , входящая в формулу (1), имеет минимальное значение. В АПС возбуждаются только неоднородные тепловые волны. По этой причине возбуждение АПС мало влияет на коэффициенты отражения (см. рис. 1) и поглощения (см. рис. 2) при  $\theta = 0$ .

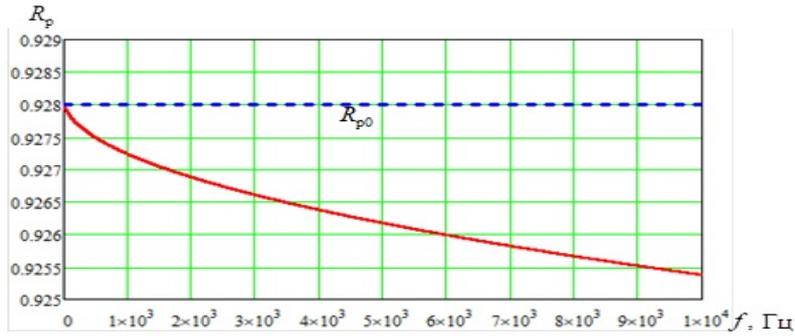


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента отражения звуковой волны при  $\theta = 0$ ;  $R_{p0} = 0,928$ .

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

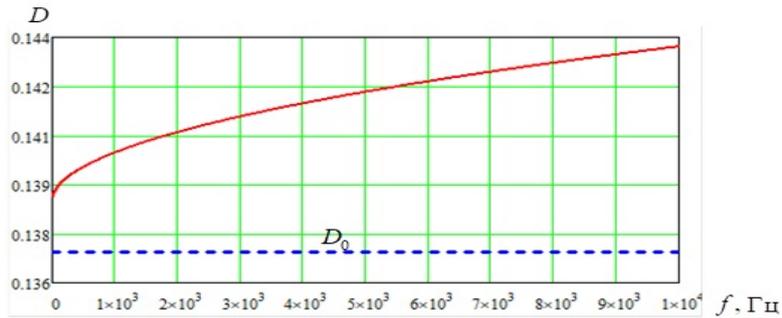


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента поглощения звуковой волны при  $\theta = 0$ ;  $D_0 = 0,137$ .

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

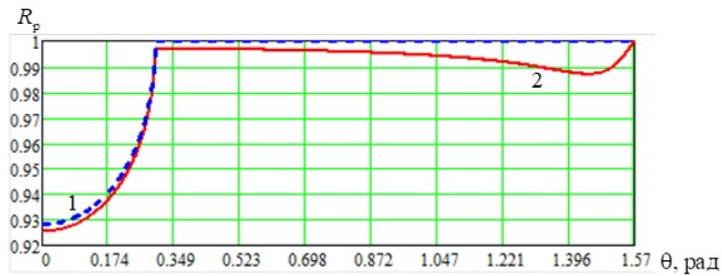


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения по давлению от угла падения на частоте  $f = 10,0$  кГц.

1 — классический расчёт; 2 — расчёт с учётом диссипации энергии в АПС.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

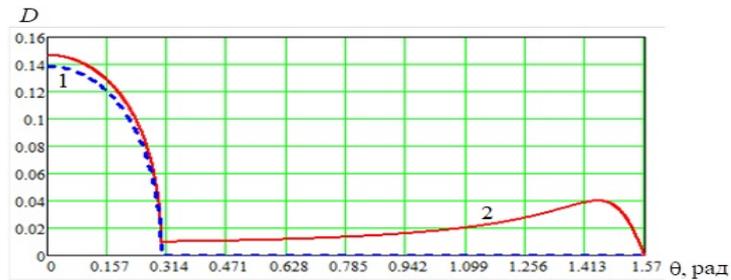


Рис. 4. Угловая зависимость коэффициента поглощения на частоте  $f = 10,0$  кГц.

1 — классический расчёт; 2 — расчёт с учётом формирования АПС.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Параметры акустического поля, возникающего при взаимодействии плоской звуковой волны с границей раздела сред, зависят от угла падения волны  $\theta$ . Для скоростей звука контактирующих сред выполняется неравенство  $c_1 < c_2$ . Следовательно, на поверхности раздела вода-сталь наблюдается явление полного внутреннего отражения. В нашем случае полное внутреннее отражение волны должно наблюдаться при углах падения  $\theta \geq \theta_{кр} = 0,30$ . Результаты расчёта угловых зависимостей модуля коэффициента отражения звуковой волны  $R_p$  показаны на рис. 3. Из рис. 3 нетрудно заметить, что акустическая прозрачность границы раздела наблюдается в диапазоне углов падения звуковой волны от 0 до  $\theta_{кр}$  (кривая 1). В этом диапазоне углов падения величина модуля коэффициента отражения  $R_p$  в основном определяется акустическими параметрами контактирующих сред. При углах  $\theta \geq \theta_{кр}$  классический коэффициент отражения  $R_p = 0$ . Наличие диссипации энергии в АПС влияет на величину модуля коэффициента  $R_p$ . В диапазоне углов падения от 0 до  $\theta_{кр}$  это влияние незначительно (см. кривую 2). При  $\theta = \theta_{кр}$  значение модуля  $R_p \neq 0$ . Увеличение угла падения приводит к уменьшению модуля коэффициента отражения. Обращает на себя внимание наличие характерного минимума при угле падения близком к  $\theta = 0,5\pi$  (угол скольжения  $\varphi = 0$ ).

Результаты численной оценки коэффициентов поглощения звука  $D$  в зависимости от угла падения волны показаны на рис. 4. Для проведения расчётов коэффициента  $D$  использовалась формула (2), в которую подставлялись выражения:  $R_p = \frac{1 - X_1}{1 + X_1}$  – классический случай (кривая 1);

(1) — расчёт с учётом формирования АПС (кривая 2). Расчёты проведены для частоты  $f = 10,0$  кГц. Анализ хода кривых, представленных на рис. 4, позволил установить следующее. В диапазоне углов падения от 0 до  $\theta_{кр}$ , где наблюдается акустическая прозрачность границы, величина  $D$  в основном определяется акустическими параметрами контактирующих сред. При  $\theta \geq \theta_{кр}$  коэффициент поглощения  $D_0 = 0$  и, как следствие этого, полное поглощение энергии целиком определяется диссипацией энергии в АПС. Из рис. 4 видно, что при  $\theta > \theta_{кр}$ , значение коэффициента  $D$  монотонно увеличивается и при угле падения  $\theta_m$  наблюдается максимум коэффициента поглощения. При  $\theta \geq \theta_m$  значения  $D$  резко уменьшаются и при  $\theta = 0,5\pi$  коэффициента  $D = 0$ . В области углов падения от  $\theta = 1,4$  до  $\theta = 0,5\pi$  на частоте  $f_1 = 10,0$  кГц нетрудно получить следующие значения параметров:  $D_m = 4,06 \cdot 10^{-2}$ ,  $\theta_m = 1,446$ ,  $\varphi_m = 0,125$  ( $7^\circ 10'$ ).

В заключение отметим. Диссипация энергии в АПС поверхности твердого тела заметно проявляется при  $\theta \geq \theta_{кр}$ . Угловые зависимости коэффициента поглощения  $D(\theta)$  всегда имеют максимум  $D_m$ , наблюдающийся при углах падения  $\theta = \theta_m$ , которые очень близки к  $0,5\pi$ . Диссипация энергии в АПС зависит от теплофизических параметров стали. Для различных марок стали поглощение звука в АПС может отличаться от представленного расчёта от 0,8 до 2 раз. Представленная здесь методика расчёта может быть использована для стенок, изготовленных из других металлов, а также для неметаллических поверхностей. Методика расчёта не изменится в случае замены жидкости каким-либо газом, например, воздухом. Результаты работы могут быть применены при разработке и проектировании акустических экранов и при акустическом проектировании трубопроводных систем судов.

#### *Литература*

1. Легуша Ф. Ф. Расчет коэффициентов отражения и прохождения плоской волны на границе раздела жидких сред с учетом их вязкости и теплопроводности // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 9, № 22. С. 1390–1392.
2. Легуша Ф. Ф. Поглощение Константинова на границе раздела жидких полупространств // ЖТФ. 1984. Т. 54, № 4. С. 671–678.
3. Легуша Ф. Ф. Эффект Константинова и поглощение звука в неоднородных средах // УФН. 1984. Т. 144, № 3. С. 509–522.

## ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В СРЕДЕ С ПОТЕРЯМИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ С ТЕПЛОПРОВОДНЫМИ СТЕНКАМИ

Ф. Ф. Легуша, д-р физ.-мат. наук, Г. В. Чижов<sup>1</sup>, К. Н. Пялов<sup>2</sup>

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия

<sup>1</sup>АО «СПМБМ «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>АО «ЦКБ МТ «Рубин», Санкт-Петербург, Россия

## SOUND VELOCITY DISPERSION OF A WAVE PROPAGATED IN MEDIUM WITH LOSSES IN A CYLINDRICAL PIPE WITH HEAT-CONDUCTING WALLS

F. F. Legusha, Dr.Sc., G. V. Chizhov<sup>1</sup>, K. N. Pialov<sup>2</sup>

Saint Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>JSC «Saint Petersburg Marine Design Bureau «Malachite», St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin», St. Petersburg, Russia

*В работе представлены результаты исследования частотной зависимости скорости распространения фронта плоской бегущей звуковой волны, распространяющейся в трубе, заполненной вязкой и теплопроводной средой. Труба изготовлена из вещества, имеющего конечные значения акустических и теплофизических параметров. Показано, что при распространении звуковой волны в трубе с твёрдыми стенками дисперсия скорости звука наблюдается в нижней части звукового диапазона частот. При этом скорость звука в среде, заполняющей трубу, меньше значения скорости звука для безграничной среды.*

*The paper presents the results of studying the velocity frequency dependence of the sound wave propagating in a pipe filled with a viscous and heat-conducting medium. The pipe is made of a substance with finite values of acoustic and thermophysical parameters. It is shown that when a sound wave propagates in a pipe with solid walls, the sound velocity dispersion is observed in the lower part of the sound frequency range. In this case, the speed of sound in the medium filling the pipe is less than the value of the speed of sound for an infinite medium.*

При проведении исследования влияния акустических течений Шлихтинга на диссипативные процессы, возникающие в акустическом пограничном слое, формирующимся при взаимодействии стоячей звуковой волны с поверхностью твердого тела, использовались протяжённые цилиндрические резонаторы различного типа [1–4]. В качестве резонаторов использовались цилиндрические трубы, внутренний объём которых заполнен воздухом. В ходе измерений собственных частот  $f_i$  было установлено, что экспериментальные значения  $f_i$  всегда меньше значений, предсказываемых теорией волноводного распространения звука. Кроме того, значения  $f_i$  собственных частот не образуют гармонический ряд, как того требует теория резонаторов.

Результаты измерений  $f_i$  использовались для расчета скорости звука в воздухе, заполняющем трубу. При этом было выяснено, что значения скоростей звука  $c_i$  зависят от номера полуволнового резонанса. Было обнаружено, что значение скорости звука уменьшаются по мере понижения частоты возбуждения резонатора. Оказалось, что численные значения  $c_i$  всегда заметно меньше скорости звука, наблюдаемой в свободном объёме воздуха. Таким образом, в работах [1–4] экспериментально было обнаружено явление дисперсии скорости распространения звуковой волны нулевого порядка, бегущей по трубе с твёрдыми теплопроводными стенками. Для того, чтобы установить причины возникновения дисперсии скорости звука в воздухе, находящемся в трубе с твёрдыми теплопроводными стенками, был проведен поиск информации об этом явлении. В ходе проведения этого анализа удалось установить, что в 1867 г. А. Кундт впервые экспериментально установил факт замедления скорости распространения нормальной звуковой волны нулевого порядка, бегущей в стеклянной цилиндрической трубе, заполненной воздухом [5]. В результате этих исследований было показано, что скорость в воздухе, заполняющем внутренний объём трубы тем меньше, чем меньше радиус трубы и чем ниже частота звуковой волны. Позже Г. Кирхгоф [6] разработал теоретическое описание физического процесса, происходящего в полости цилиндрической трубы, заполненной вязким и теплопроводным веществом, в котором распространяется бегущая звуковая волна. Для этого Г. Кирхгоф [6] рассмотрел задачу о замедлении скорости движения фронта плоской звуковой волны, распространяющейся в цилиндрической трубе с твёрдыми абсолютно теплопроводными

стенками. При этом было показано, что в отличие от неограниченной среды, в трубе появляется дополнительный механизм поглощения звука, связанный с процессом формирования акустического пограничного слоя (АПС) на внутренней поверхности трубы. Диссипация энергии волны в АПС приводит к её затуханию, величина которого характеризуется пространственным коэффициентом затухания (ПКЗ)

$$\alpha_{\text{тр}} = 1,17(b_{11} + b_{21}) / R, \quad (1)$$

где  $b_{11} = (\gamma - 1)\sqrt{\omega a / 2c^2}$ ,  $b_{21} = \sqrt{\omega \nu / 2c^2}$ ;  $\omega = 2\pi f$  — частота;  $\gamma$  — коэффициент Пуассона;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости;  $c$  — скорость звука в среде, заполняющей трубу;  $R$  — радиус поперечного сечения трубы.

Параметры  $b_{11}$  и  $b_{21}$  имеют физический смысл коэффициентов поглощения звука в АПС, обусловленных соответственно теплопроводностью и вязкостью вещества. Коэффициент 1,17 в выражении (1) введен нами. Этот коэффициент появляется в результате использования в диссипативном интеграле реальных распределений амплитуд вязкой и тепловой волны в направлении их распространения. Формула (1) получена для гладкой твердой поверхности. Кроме того, Г. Кирхгоф установил, что процесс диссипации энергии в АПС влияет на скорость распространения фронта плоской звуковой волны, бегущей в вязкой и теплопроводной среде, заполняющей трубу. Скорость звука становится зависящей от частоты звуковой волны и радиуса трубы. Её величина определяется выражением

$$c_i = \frac{\omega}{m_2} = \frac{\omega}{k + \alpha_{\text{тр}}} = \frac{\omega}{k \left(1 + \frac{\alpha_{\text{тр}}}{k}\right)} = \frac{c}{1 + \frac{c \alpha_{\text{тр}}}{\omega}}. \quad (2)$$

Физическое обоснование, представленное Г. Кирхгофом в статье [2], позволяют предположить, что формула (2) верна. Несовпадение результатов измерений, полученных А. Кундтом, и теории Г. Кирхгофа связаны, в первую очередь, с неверной оценкой диссипации энергии в АПС внутренней поверхности трубы, изготовленной из вещества с реальными физическими параметрами. Напомним, что оценку диссипации энергии Г. Кирхгоф производил, полагая, что внутренняя поверхность трубы является твёрдой и абсолютно теплопроводной стенкой. В то время как на практике мы имеем трубы, стенки которых изготовлены из вещества, имеющего конечные значения теплоизоляционных свойств. Современное аппаратное обеспечение акустических измерений позволяет провести экспериментальную проверку выражения (2). Проведение этих измерений является основной задачей нашего исследования. Для этих измерений был изготовлен четвертьволновой резонатор, в виде короткого отрезка прямой цилиндрической трубы, один из торцов которой был закрыт жесткой крышкой. Открытое отверстие трубы фланца не имеет. Собственные частоты таких резонаторов определяются по формуле:

$$f_i = (2n + 1)c / 4L_E, \quad (3)$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots$  — целые числа;  $L_E = L + 0,635R$  — эффективная длина резонатора без фланца;  $i = 2n + 1$ ,  $L$  — расстояние от внутренней поверхности крышки до плоскости выходного отверстия трубы.

Значения собственных частот полуволновых резонаторов  $f_i$  определялись экспериментально. После подстановки их значений в выражение (3) находим скорость звука в веществе, заполняющем трубу

$$c_i = 4L_E f_i / (2n + 1). \quad (4)$$

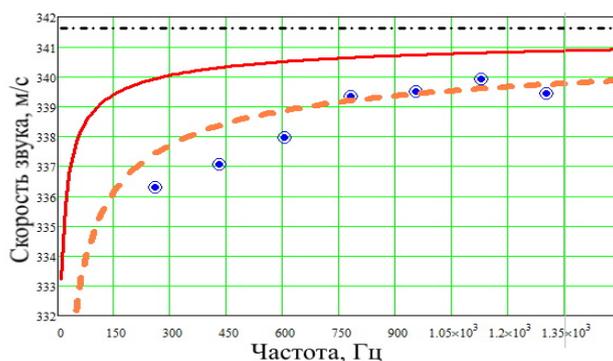


Рис. 1. Частотная зависимость скорости фронта звуковой волны, бегущей в воздухе, находящимся в цилиндрической трубе с теплопроводящими стенками.

- 1 —  $c_0 = 341,6$  м/с; 2 — формула (2) с использованием выражения (1);  
 3 — формула (2) для случая  $2,5 \alpha_{\text{тр}}$ ; ● — экспериментальные значения.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Таким образом, измерения значений собственных частот  $f_i$  позволяет определить скорость звука в среде и построить частотную зависимость  $c_i$ . Труба резонатора, использованная при проведении измерений, была изготовлена из поливинилхлорида (ПВХ) и имела следующие геометрические размеры: длина  $L = 963,0$  мм, радиус  $R = 23,0$  мм, толщина стенки  $d = 2,0$  мм. В процессе измерений труба была заполнена воздухом при статических значениях давления  $P_0 = 1,0$  атм. и температуры  $T_0 = 289$  К ( $16^\circ\text{C}$ ). При таких условиях скорость звука в свободном объеме воздуха  $c_0 = 341,8$  м/с, а в воздухе, заполняющем трубу,  $c_0 = 341,6$  м/с. Следовательно, труба имеет достаточно жесткие стенки. Для измерения собственных частот резонатора применялась стандартная методика. Экспериментальные значения частот  $f_i$  использовались в выражении (4) для расчета значений скорости звука в воздухе, заполняющем трубу. Результаты расчетов и обработки измерений показаны на рис. 1. Для расчета дисперсионной кривой — 1 использована формула (2), в которой значения ПКЗ получали при помощи выражения (1). Результатом измерений является ряд значений собственных частот резонатора  $f_i$ :  $f_3 = 258$  Гц;  $f_5 = 431$  Гц;  $f_7 = 605$  Гц;  $f_9 = 781$  Гц;  $f_{11} = 955$  Гц;  $f_{13} = 1130$  Гц;  $f_{15} = 1302$  Гц. Полученные значения  $f_i$  использовались в выражении (4) для расчета величины фазовой скорости  $c_i$ . Эти значения  $c_i$  представлены на графике в виде точек (см. рис. 1, кривая 3). Из графиков, представленных на рисунке, можно сделать следующие выводы. Экспериментально подтверждено наличие частотной зависимости скорости звука нормальной звуковой волны нулевого порядка, распространяющейся в трубе, стенки которой изготовлены из вещества, имеющего конечные значения теплофизических параметров. Экспериментальные значения скорости звука (см. точки на рисунке) располагаются заметно ниже дисперсной кривой Кирхгофа (2). Это указывает на то, что физическая модель, на основе которой получена формула (1), не в полной мере описывает диссипативные процессы, протекающие в АПС стенок трубы, изготовленной из вещества, имеющего реальные теплофизические характеристики. Кривая 2 и экспериментальные значения скорости звука в воздухе, заполняющем трубу, синхронно уменьшаются по мере понижения частоты. Если в выражение (2) подставить увеличенные в 2,5 раза значения ПКЗ (1), то получим дисперсионную кривую 3. Как видно из рисунка кривая 3 хорошо ложится на область экспериментальных значений скорости звука. На этом основании можно сделать следующие выводы: 1) выражение (2) можно применять для расчёта дисперсионных кривых в газах, заполняющих внутренний объём реальных труб; 2) формула (1) дает значения ПКЗ не достаточные для оценки диссипации энергии в АПС реальной твёрдой поверхности.

В рамках физической модели газ - твёрдое абсолютно теплопроводное тело дополнительные механизмы диссипации энергии звуковой волны обнаружить не удаётся. Это связано с тем, что согласно определению, абсолютно теплопроводного тела в его объёме и в том числе на его поверхности возбуждение каких-либо физических процессов не возможно. Акустическая добавка к температуре среды в звуковой волне на поверхности такого тела всегда равна нулю.

На практике мы всегда имеем дело с границей раздела газ – твёрдое тело, имеющее конечные значения теплофизических параметров. При взаимодействии звуковой волны, распространяющейся в вязкой и теплопроводной среде, с поверхностью реального твёрдого тела амплитуда акустической добавки к температуре среды не равна нулю. Температура поверхности тела изменяется по гармоническому закону, в результате чего в АПС контактирующих сред возникают дополнительно две неоднородные тепловые волны. Затухание этих волн в газе и твёрдом теле должно приводить к увеличению диссипации энергии звуковой волны в АПС. Этот механизм поглощения звука необходимо рассмотреть отдельно.

В рамках представленного здесь материала нельзя ни чего сказать о зависимости скорости звука в среде, заполняющей трубу, от радиуса её поперечного сечения. Для этого необходимо провести экспериментальные исследования дисперсионных кривых труб различного диаметра. Предметом будущих исследований также является численная оценка вклада течений Шлихтинга в затухание продольных стоячих волн, образующихся в трубах. Разработка математического аппарата, позволяющего описать потери акустической энергии, возникающие при взаимодействии бегущей продольной волны с внутренней поверхностью теплопроводной и упругой стенки трубы.

### *Литература*

1. Берестовицкий Э. Г., Легуша Ф. Ф., Мусакаев М. А., Олейник М. М. Механизмы поглощения звука в стоячей волне, возбуждённой в цилиндрической трубе // Судостроение. 2011. Вып. 3. С. 42–44.
2. Берестовицкий Э. Г., Легуша Ф. Ф., Мусакаев М. А. Экспериментальные исследования вклада акустических течений Шлихтинга в диссипацию энергии в стоячей звуковой волне // Судостроение. СПб., 2013. Вып. 2. С. 38–43.
3. Легуша Ф. Ф., Чижов Г. В. Формирование акустического пограничного слоя при взаимодействии стоячей звуковой волны с поверхностью твёрдого тела. СПб.: МИТ. 2018. Т. 1, № 2(40). С. 114–118.
4. Легуша Ф. Ф., Чижов Г. В. Влияние вихрей Шлихтинга на поглощение звука поверхностью твёрдого тела // Динамика и виброакустика. 2018. Т. 4, № 4. С. 18–20.
5. Kundt A. Über die Schallgeschwindigkeit der Luft in Röhren. Monatsbericht der Berl. Ak. 19 Dec. 1867. S. 858–864.
6. Kirchoff G. Ueber den Einfluss der Wärmeleitung in einem Gase auf die Schallbewegung, Poggendorfs Annalen und Chemie. 1868. Bd. 134, № 6. S. 177–193.

## МОДЕЛЬ СХЕМЫ ДАННЫХ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ВООРУЖЕНИЯ

*А. В. Шатохин*, канд. экон. наук, *Я. А. Ивакин*, д-р техн. наук, *И. А. Красников*  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## DATA SCHEME MODEL FOR THE DIGITAL TWIN OF THE LIFECYCLE OF HYDROACOUSTIC EQUIPMENT PRODUCTS

*A. V. Shatokhin*, Ph.D., *Ya. A. Ivakin*, Dr.Sc., *I. A. Krasnikov*  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*В современных условиях предприятия морского приборостроения выступают не только разработчиками, изготовителями высоко сложных изделий вооружения, военной и специальной техники, но и фактически участвуют в поддержании эксплуатационной готовности на всех этапах их жизненного цикла, в формировании оборонно-промышленного потенциала страны. Это в полной мере относится к изделиям гидроакустического вооружения ВМФ. Предприятия-изготовители в ходе участия в мероприятиях по поддержанию их технической готовности объективно накапливают данные о фактической реализации жизненного цикла указанных изделий. Учитывая реализуемую сегодня политику цифровизации экономики, накапливаемые данные по фактической реализации такого жизненного цикла нуждаются в системном упорядочении и комплексировании. Предлагаемая в докладе модель есть предложение рационального подхода к систематизации и организации накопления данных по эксплуатации и фактической реализации жизненного цикла каждого изделия гидроакустического вооружения.*

*In modern conditions enterprises of marine instrument engineering act not only as developers, manufacturers of highly complicated products of arms, military and special equipment, but also actually participate in maintenance of operational readiness at all stages of their lifecycle, in forming of defense and industrial potential of the country. It is fully applied to products of hydroacoustic equipment of the Navy. Manufacturers, during participation in maintenance of the equipment technical readiness, accumulate data on the actual implementation of lifecycle of the specified products. Taking into consideration the policy of economy digitalization being implemented nowadays, the accumulated data on the actual implementation of such lifecycle need system streamlining and integration. The model offered in the article is a rational approach to systematization and organization of acquisition of data on operation and actual implementation of lifecycle of each product of hydroacoustic equipment.*

Современные изделия гидроакустической техники во многом являются уникальными образцами морского приборостроения, в силу чего предприятия-изготовители в ходе участия в мероприятиях по поддержанию их эксплуатационно-технической готовности вынуждены накапливать данные о реализации жизненного цикла таких изделий. Создаваемая таким образом, структурированная по изделиям, база данных о возникавших неисправностях, мероприятиях технического обслуживания, восстановительных ремонтах и пр. представляет собой результативную информационную основу для формирования политики предприятий морского приборостроения в области реализации сервисных услуг гарантийного и постгарантийного обслуживания поставляемой гидроакустической аппаратуры. Это говорит о необходимости учета возможности технологии цифровых двойников жизненного цикла при формировании информационных структур обеспечения оборонно-промышленного потенциала России. Существо, принципы и инфраструктурная основа формирования такой политики представлены в работах [1–3]. В условиях реализации политики цифровизации экономики и цифровой трансформации общества в РФ необходимы комплексное упорядочение и систематизация указанной информационной основы. Это позволит качественно усовершенствовать сервисное и техническое обслуживание указанных изделий, повысить результативность авторского надзора за их программным обеспечением и пр. за счет обеспечения роста эффективности и адекватности процессов управления при распределении усилий предприятий морского приборостроения по техническому обслуживанию и ремонту эксплуатируемой гидроакустической аппаратуры на поздних этапах жизненного цикла. Накопленные и системно упорядоченные данные по отказам узлов и элементов, проведенным мероприятиям технического обслуживания, восстановительным ремонтам, заменам и внесенным конструктивным изменениям в своей совокупности позволяют сформировать т.н. «цифровой двойник жизненного цикла» для изделий

гидроакустического вооружения ВМФ. Цифровой двойник жизненного цикла изделия гидроакустического вооружения — это виртуальная (информационная) копия процесса эксплуатации указанного изделия на протяжении всех этапов его жизненного цикла, позволяющий осуществлять информационно-компетентную поддержку, анализ, манипулирование эффективностью, а в конечном итоге, оптимизацию самого процесса эксплуатации. При этом не следует путать понятия «цифровой двойник жизненного цикла изделия» и «цифровой двойник самого изделия»: первое понятие отражает именно процесс эксплуатации изделий гидроакустической техники, в то время, второе понятие — это цифровая копия, предусматривающая отражение вопросов конструктивного устройства, функциональности и применения искомого изделия гидроакустической техники. Соответственно, содержательное наполнение и структура данных цифровых двойников указанных категорий будет разное. Ориентация на системное накопление данных по особенностям текущей эксплуатации изделий отечественного гидроакустического вооружения за счет реализации и использования специализированной инфотелекоммуникационной инфраструктуры, а именно соответствующей информационно-сопроводительной сети для указанных изделий, подробно описано в [1–4]. Развитие модели для цифровых двойников жизненного цикла изделий отечественного гидроакустического вооружения позволяет добиться функционального упорядочения и интеграции описываемых данных. Именно поэтому предлагаемая модель цифрового двойника жизненного цикла гидроакустических изделий сведена в работе к обоснованию рациональных структуры данных по эксплуатации указанных изделий и формата их формализованного представления.

Жизненный цикл — совокупность явлений и процессов, повторяющаяся с периодичностью, определяемой временем существования типовой конструкции изделия от её замысла до утилизации или конкретного экземпляра изделия от момента завершения его производства до утилизации [5, 6]. Реализация на практике указанной взаимосвязанной совокупности явлений и процессов создания, эксплуатации, применения по назначению, ремонта и утилизации всех изделий гидроакустической техники, создаваемой в интересах Военно-Морского Флота, позволяет логически строго выделить такую нормативную категорию как «Жизненный цикл изделия гидроакустического вооружения ВМФ». Очевидно, что под такую категорию попадают вопросы эксплуатации, поддержания технической готовности и ремонта всех видов гидроакустических станций и комплексов, устанавливаемых на кораблях флота, а также стационарных гидроакустических изделий, систем освещения подводной обстановки ВМФ на гидроакустических принципах функционирования. Традиционно данные о реализации и специфике протекания жизненного цикла каждого из изделий гидроакустического вооружения ВМФ находили свое отражение в таких обязательных организационно-технических документах как: формуляр изделия, журнал эксплуатации, отчеты по эксплуатации радиоэлектронных средств за поход, и пр. Однако, накопление, систематизация и обобщение указанных данных осуществлялось на периодической основе, в рамках традиционной схемы бумажного документооборота между соответствующими войсковыми частями, институтами военно-научного сопровождения и органами военного управления (ОВУ) ВМФ. В современных условиях, когда ОВУ ВМФ предпринимают последовательные шаги к совершенствованию существующей системы эксплуатации гидроакустического вооружения и переводу информационно-распорядительного взаимодействия в рамках этой системы на цифровые основы, предприятия морского приборостроения создают соответствующие организационные структуры, ориентированные именно на техническое обслуживание и авторский надзор изделий на протяжении всего их жизненного цикла; разворачивают соответствующую инфотелекоммуникационную инфраструктуру в виде информационно-сопроводительной сети изделий гидроакустического вооружения флота [1–4]. Согласно существующей и активно развиваемой нормативной и нормативно-технической базы, например [5–8], организации процессов планирования, обеспечения и реализации процессов эксплуатации и технического обслуживания радиоэлектронных средств и систем ВМФ, в том числе гидроакустического вооружения, именно информационно-сопроводительная сеть изделий указанного вооружения выступит институциональным центром накопления, интеграции и обобщения данных по реализации жизненного цикла каждого из изделий. Такой институциональный центр накопления данных по эксплуатации гидроакустической техники ВМФ выступит основой для координации

усилий сервисных и обслуживающих организаций, обоснования решений по распределению ассигнований на поддержание технической готовности изделий гидроакустического вооружения, а также для ретроспективного анализа эффективности принимаемых усилий по совершенствованию самой организационно-технической системы эксплуатации радиоэлектронных средств и систем флота [9]. Обобщение данных по отказам и неисправностям различных схем, блоков и узлов поставляемых флоту гидроакустических комплексов позволит актуализировать исходные данные для конструирования новой и усовершенствования существующей техники, в рамках диагностического подхода описанного в [10, 11]. Необходимость учета алгоритмической специфики указанного обобщения объективно требует обоснования рациональной логической структуры данных для представления цифровой информации по реализации жизненного цикла каждого из изделий гидроакустического вооружения. Логическая (инфологическая) схема представления данных по протеканию жизненного цикла изделий гидроакустического вооружения флота есть существо предлагаемой модели цифрового двойника такого цикла. Рациональный характер такой схемы данных определяется соответствием сложившимся подходам к традиционному структурированию описанию процессов проектирования, изготовления, эксплуатации, ремонта и утилизации изделий гидроакустического вооружения, а также результатами первичной натурной апробации предварительных программных разработок соответствующих цифровых двойников жизненного цикла.

Предлагаемая логическая схема данных по жизненному циклу изделий гидроакустического вооружения показана на рис. 1. На уровне программной реализации представляемая схема данных реализуется в рамках соответствующей онтологии для распределенной базы данных информационно-сопроводительной сети изделий гидроакустического вооружения ВМФ, на принципах описанных в [12]. Предлагаемое инфологическое структурирование в виде схемы данных создает основу не только для системных интеграции и слияния данных по эксплуатации изделий гидроакустического вооружения Военно-морского Флота, но и для полноценного применения современного инструментария интеллектуального анализа данных, реализующего технологии таких перспективных, но доказавших свою актуальность научных направлений современной информатики как Big Data и Data Mining. Обобщение и систематизация данных как по жизненному циклу каждого изделия гидроакустического вооружения, так и по группам однотипных изделий создает эмпирическую базу данных для выявления «слабых мест» в надежности примененных схмотехнических решений, обоснования рационального состава и количества запасных имущества и принадлежностей (ЗИП) для каждого типа изделий, а также для определения проверенных практикой приемов диагностики и поддержания работоспособности рассматриваемых изделий в условиях боевой службы и дальних походов кораблей флота.

Представленная на рис. 1 логическая схема данных является достаточно обобщенной и показывает только самые верхние уровни декомпозиции основных классов и подклассов цифрового двойника изделий гидроакустического вооружения ВМФ. При практической реализации она детализируется до конкретных типов записей, экземпляров классов, значений информационных полей и пр. Приведенное представление на физическом уровне реализуется в рамках соответствующей модели базы данных, что позволяет в дальнейшем осуществлять обработку, обобщение и слияние информации по определенным аспектам эксплуатации и восстановления технической готовности соответствующих групп изделий гидроакустического вооружения. (Например, устанавливать необходимый объем и номенклатуру пополнения ЗИП изделий, установленных на кораблях конкретного соединения или объединения ВМФ.) Возможности по интеграции и слиянию информации цифровых двойников жизненного цикла конкретных изделий гидроакустического вооружения ВМФ определяются и достигаются за счет широкого применения соответствующих служебных (т.н. префиксных) данных в рамках предлагаемой модели на физическом уровне её представления. Использование таких данных позволяет значительно расширить и рационализировать возможности по интеграции различных данных как из различных массивов в составе одного цифрового двойника жизненного цикла конкретного изделия, так и по слиянию данных из соответствующих полей по произвольному ряду указанных цифровых двойников. Наличие данных об установлении функциональной связи между полями различных таблиц в базе данных позволяет эффективно учитывать весь



Интеграция данных в рамках цифрового двойника жизненного цикла конкретного образца гидроакустического вооружения позволяет не только получить сводные оценки по техническому состоянию текущего изделия, обоснованно спланировать требуемые объемы ремонтно-восстановительных работ и пополнения запасного имущества и принадлежностей (ЗИП), хронологизировать весь ход применения и эксплуатации изделия, и пр., но и осуществлять определенное прогнозирование его состояния, компетентно поддерживать процесс поиска неисправностей, систематизировать данные по изменению характеристик изделия [10, 11]. Слияние данных по критериально определенному множеству цифровых двойников жизненного цикла образцов указанных изделий позволяет добиться выявления устойчивых тенденций в организации процесса поддержания технической готовности, конструктивных недостатков всей серии изделий, а также особенностей функционирования изделий в разных условиях применения.

Возможности по формированию и совершенствованию цифровых двойников жизненного цикла изделий гидроакустической техники, а также по интеграции и слиянию данных на базе указанных цифровых двойников были смоделированы и оценены в процессе реализации апробационного примера. Апробация была проведена применительно к неполной, абстрактной реализации цифрового двойника жизненного цикла изделия МГК-400 В.1 на базе универсальной СУБД MS<sup>9</sup> Access. Реализованная схема данных и основные рабочие окна, использовавшиеся для манипулирования данными в рамках апробации показаны на рис. 2.

Результаты проведенной апробации на указанном примере позволяют сделать вывод о программной реализуемости и работоспособности предлагаемой модели цифрового двойника жизненного цикла изделий гидроакустического вооружения ВМФ. Её дальнейшее развитие требует более емких исследований и основательных программно-технических проработок на основе данных по эксплуатации реальных образцов (изделий) гидроакустического вооружения флота, что будет сделано в обозримой перспективе. Это позволит более детально определить основные программные методы обработки данных указанных цифровых двойников, принципы их накопления и дальнейшего применения.

Выдвижение концепции и активное продвижение модели цифрового двойника жизненного цикла изделий гидроакустического вооружения является отражением широкой тенденции современного морского приборостроения на всестороннюю цифровизацию всех аспектов разработки, создания, эксплуатации и утилизации дорогостоящих образцов наукоемкой техники. Именно этим фактом её определяется актуальность и перспективность дальнейшего развития, а также влияние на процессы обеспечения и развития оборонно-промышленного потенциала страны.

Активное развитие инфраструктуры предприятий морского приборостроения по предоставлению услуг поддержания технической готовности различных видов радиоэлектронного (в т.ч. гидроакустического) вооружения в пунктах базирования флота объективно стимулирует создание соответствующих информационных технологий по планированию, обеспечению и учету таких услуг. Именно к таковым информационным технологиям следует отнести работы по созданию, развертыванию и ведению распределенных баз данных цифровых двойников жизненного цикла изделий гидроакустического вооружения ВМФ. Дальнейшее совершенствование указанных баз и информационной технологии позволит добиться качественного роста в применении современных, высоко эффективных методов и форм эксплуатации всех видов изделий гидроакустического вооружения флота, а в конечном итоге, всех видов вооружения и военной техники в РФ.

#### *Литература*

1. Шатохин А. В., Ивакин Я. А., Нештенко В. С. Координирование услуг предприятий морского приборостроения в интересах системы эксплуатации гидроакустического вооружения ВМФ // Морской сборник. 2020. № 11. С. 12–54.
2. Шатохин А. В., Ивакин Я. А. Современный подход к участию предприятий морского приборостроения в поддержании технической готовности гидроакустического вооружения ВМФ // Морская радиоэлектроника. 2020. № 4(21). С. 56–67.
3. Шатохин А. В. Информационная инфраструктура поддержки эксплуатации гидроакустического вооружения ВМФ предприятиями морского приборостроения / Под ред. А. В. Шатохин, Я. А. Ивакин // Гидроакустика. 2020. № 42(2). С. 61–69.

4. Ивакин Я. А., Потапычев С. Н. Модель информационно-сопроводительной сети для изделий отечественного гидроакустического вооружения // Гидроакустика. 2019. № 39(3). С. 81–88.
5. ГОСТ РВ 15.004 – 2004 СРППП. Военная техника. Стадии жизненного цикла изделий и материалов. М., Росстандарт, 2006. 54 с.
6. ГОСТ Р 56136 – 2014 Управление жизненным циклом продукции военного назначения. Термины и определения. М., Стандартинформ, 2016. 24 с.
7. Руководство по эксплуатации и ремонту радиоэлектронных средств ВМФ (Р-РЭС-85). М., Воениздат, 1985.
8. Временное руководство по ремонту и эксплуатации радиотехнического вооружения ВМФ (Р-РТВ-2016). СПб., РТС ВМФ, 2016.
9. Шатохин А. В. Информационно-сопроводительная сеть – новый подход к эксплуатации гидроакустического вооружения // Национальная оборона. 2020. № 1(28). С. 51–56.
10. Красников И. А., Родимова Р. И. Создание систем технического диагностирования гидроакустических комплексов // Гидроакустика. СПб.: АО «Концерн «Океанприбор», 2019. № 37(1). С. 47–55.
11. Красников И. А. Прогнозирующий контроль многоканальной части гидроакустического комплекса // Гидроакустика. СПб.: АО «Концерн «Океанприбор». 2019. № 38(2). С. 59–66.
12. Потапычев С. Н., Ивакин Я. А. Использование геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений // Вест. СПбГУТиД. Сер. 1. «Естественные и технические науки». 2018. № 2. С. 24–32.

## ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ДИВЕРСИФИКАЦИИ ВОЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

*А. В. Шатохин*, канд. экон. наук, *И. А. Селезнев*, д-р техн. наук, *Я. А. Ивакин*, д-р техн. наук  
АО «Концерн «Океанприбор», Санкт-Петербург, Россия

## ENVIRONMENTAL DIRECTION OF THE DIVERSIFICATION OF MILITARY AND ECONOMIC POTENTIAL OF HYDROACOUSTIC INSTRUMENT ENGINEERING

*A. V. Shatokhin*, Ph.D., *I. A. Seleznev*, Dr.Sc., *Ya. A. Ivakin*, Dr.Sc.  
JSC «Concern «Oceanpribor», St. Petersburg, Russia

*Решение задач диверсификации оборонно-промышленного комплекса страны, применительно к предприятиям гидроакустического приборостроения, потребовало качественно новых парадигмы и подходов к организации их производственных процессов, процессов разработки и проектирования новых видов техники и пр. Одним из аспектов указанных изменений, реструктурирования военно-экономического потенциала в рамках диверсификации ОПК явился новый взгляд на вопросы экологичности оборонного производства и приложения возможностей гидроакустического приборостроения для решения практических экологических задач на акваториях страны. Анализу перспективности усилий по совершенствованию военно-экономического потенциала гидроакустического приборостроения в указанном аспекте посвящена данная статья.*

*Solving the problems of diversification of defense and industrial complex of the country with regard to hydroacoustic instrument engineering enterprises required qualitative new paradigm and approaches to organization of its production processes, development and designing processes of new types of equipment et al. One of the aspects of stated changes, restructuring of military and economic potential within the diversification of the defense and industrial complex was new view on the issues of the ecological compatibility of military production and application of possibilities of hydroacoustic instrument engineering for solving practical environmental tasks in water area of our country. This paper is devoted to the analysis of prospects of effort on development of military and economic potential of hydroacoustic instrument engineering in stated aspect.*

Под диверсификацией производства понимается реализация совокупности мероприятий, направленных на обеспечение устойчивости и стабильности функционирования научно-производственных предприятий в условиях снижения государственного оборонного заказа. Решение этой задачи должно привести к росту объемов выпуска продукции гражданского назначения на предприятиях оборонно-промышленного комплекса (ОПК) страны [1–5]. Предприятия гидроакустического приборостроения в полной мере участвуют в решении задачи диверсификации. Их основной функцией является разработка, производство, поставка и техническое обслуживание гидроакустического вооружения Военно-Морского Флота. Вместе с тем, именно предприятия ОПК реализуют роль научной и технологической базы по ряду направлений отечественного морского инновационного приборостроения. Одним из перспективных направлений диверсификации гидроакустического приборостроения является разработка и создание высокотехнологичных приборов и комплексов контроля, оперативной оценки и прогнозирования экологического состояния вод различных акваторий. Вместе с тем, освоение компетенций современной экологии отражается и на культуре производственных процессов самого гидроакустического приборостроения. В частности, в рамках развиваемых технологий прикладной гидроакустики реализуются принципы минимизации техногенного воздействия на окружающую среду.

АО «Концерн «Океанприбор» активно включилось в процесс диверсификации своего производства. Одним из направлений стало создание приборов морского экологического контроля вод морских акваторий и пресноводных водоемов. В частности, АО «Концерн «Океанприбор» совместно с Институтом природно-технических систем (ИПТС) реализуют проект по созданию автоматизированной системы контроля экологического состояния акваторий бухт г. Севастополя. В первый год реализации проекта разработан, изготовлен и прошел опытную эксплуатацию промышленный образец буйковой станции для автоматизированной системы экологического контроля. В текущем году будет создан информационно-мониторинговый центр сбора и геопространственной интеграции текущих

данных от сети буйковых станций, что позволит снабжать потребителей актуальной информацией о степени загрязнения вод в бухтах города в реальном масштабе времени. Ведущее научно-производственное предприятие страны в области гидроакустического приборостроения АО «Концерн «Океанприбор» активно включилось в процесс диверсификации своего производства. Перспективным направлением такой диверсификации стало создание приборов и систем морского экологического контроля вод морских акваторий и пресноводных водоемов. В частности, АО «Концерн «Океанприбор» совместно с ИПТС реализуют диверсификационный проект по созданию автоматизированной системы контроля экологического состояния акваторий бухт г.Севастополя. Такая система необходима для оперативного контроля состояния воды на пляжах и критически важных с социальной точки зрения акваториях города.

На сегодняшний день обоснован концептуальный проект и план создания указанной автоматизированной системы. Учеными-исследователями ИПТС в работе [6] обоснованы 72 индикативные географические точки в акватории бухт города, анализ чистоты воды в которых, позволяет перейти к интегральным заключениям о естественной чистоте или факте загрязнения природной среды той или иной акватории. Обобщенный вид расположения описанных индикативных географических точек показан на рис. 1.

В целом, автоматизированная система контроля экологического состояния акваторий бухт г. Севастополя представляет собой совокупность:

- буйковых экостанций контроля состояния воды, устанавливаемых в 52 географические точки в акватории города;
- телекоммуникационной подсистемы на базе универсальных GSM-каналов;
- центрального сервера сбора данных мониторинга от буйковых экостанций, их обобщения и интеграции на геоинформационной основе, автоматизированного анализа и прогнозирования развития экологической ситуации (в терминологии из [7]);
- сервера баз данных и локального Data-центра;
- группы автоматизированных рабочих мест, объединяемых в локальный ситуационный центр или дублирующих таковой в здании Администрации города.

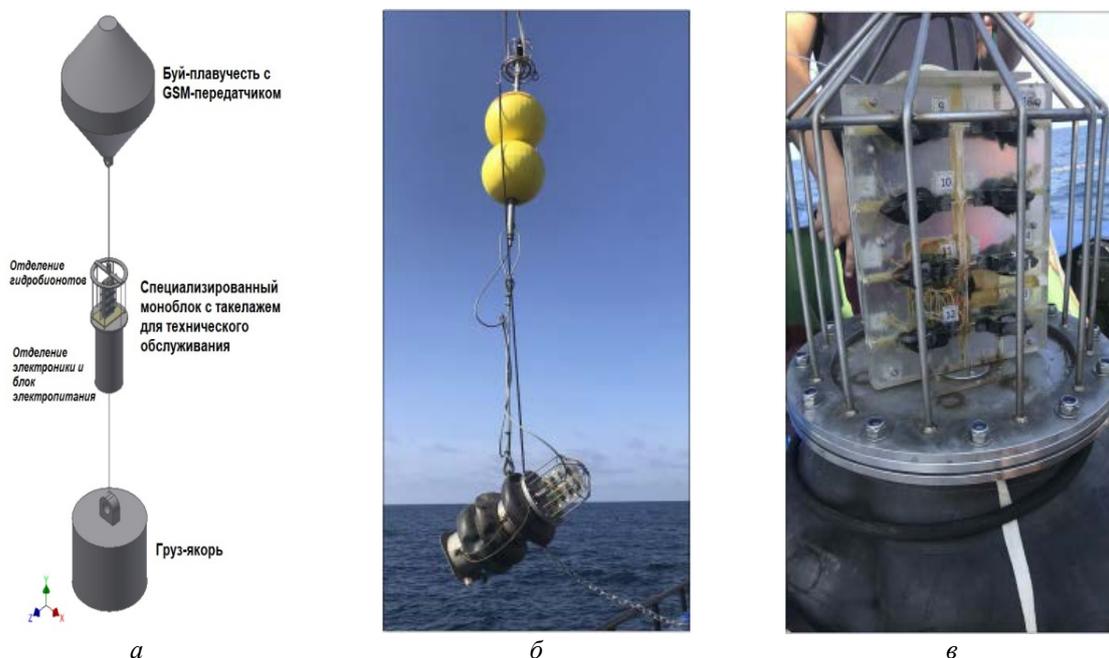


Рис. 1. Буйковая экостанция.

*а* — принципиальная схема конструкции; *б* — внешний вид при установке в акватории;  
*в* — внешний вид отделения гидробионтов.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Функционирование автоматизированной системы контроля экологического состояния акваторий бухт города предполагает круглосуточный, непрерывный мониторинг качества воды в выше обозначенных географических точках с помощью осредненной реакции группы гидробионтов. В рамках каждой буйковой экостанции контроля состояния воды автоматически оценивается поведение (ширина раскрытия створок моллюсков для естественной фильтрации воды) группы гидробионтов. Факт загрязнения выражается в резком сужении зазора или закрытии створок моллюсков. Обобщенные данные по группе гидробионтов ежеминутно передаются с моноблока на GSM-передатчик, установленный непосредственно на буйке-плавучести. Далее указанные данные по каналам сотовой связи передаются на центральный сервер сбора данных мониторинга от всех буйковых экостанций для обобщения и интеграции на геоинформационной основе, а также автоматизированного анализа и прогнозирования экологической ситуации. В последствии интегрированная и обобщенная информация о естественной чистоте вод указанных акваторий передается потребителям или используется в работе создаваемого ситуационного центра. В первый год реализации проекта разработан, изготовлен и прошел опытную эксплуатацию промышленный образец буйковой экостанции для указанной автоматизированной системы экологического контроля. В текущем году будет реализовано создание информационно-мониторингового центра сбора и геопространственной интеграции данных от сети буйковых станций, что позволит снабжать потребителей (Ситуационный центр Губернатора г. Севастополя, Дежурный службы Роспотребнадзора и МЧС и пр.) актуальной информацией о степени загрязнения вод в бухтах города в реальном масштабе времени. Указанная буйковая экостанция спроектирована как специализированный моноблок, устанавливаемый на донный якорь и необходимую плавучесть, как это показано на рис. 1. Такой моноблок включает в себя специальное отделение с гидробионтами: шестнадцать черноморскими мидиями и прикрепленными к ним электромагнитными датчиками измерения раскрытия створок этих моллюсков, а также отделение с электроникой и аккумуляторную батарею. Моноблок снабжен комплексом такелажа для обеспечения всплытия моноблока для проведения технического обслуживания без снятия экостанции с якоря. В августе–декабре 2021 г. был подготовлен и размещен в акватории взморья г. Севастополя на водных угодьях аквафермы марикультуры в районе п. Кача первый промышленный образец указанной буйковой экостанции для проведения опытной эксплуатации. При этом опытный образец экостанции, установленный и эксплуатируемый в бухте Мартынова севастопольского рейда также был включен в систему, а результаты мониторинга качества воды в интегральном виде накапливались на сервере данных в ИПТС и в реальном масштабе времени отображались в специально разработанной прикладной программной среде, что показано на рис. 2.

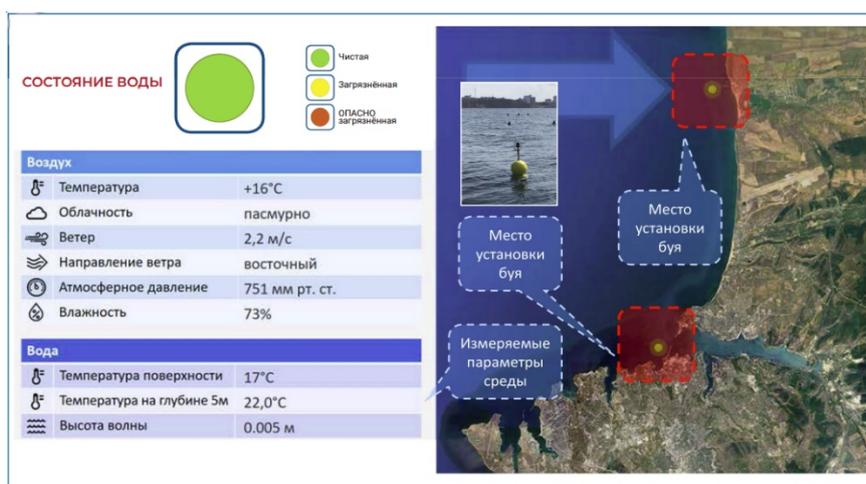


Рис. 2. Опытная эксплуатация экостанции.

*a* — пользовательский интерфейс программной среды интеграции данных;  
*б* — географические место установки первого серийного и опытного образцов.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Результаты проведения опытной эксплуатации позволили убедиться в работоспособности созданных технических решений, а также определить пути их дальнейшего совершенствования. Данные, полученные от экостанции в ходе длительной опытной эксплуатации, показали четкую корреляцию регистрируемых реакций гидробионтов с фактами поступления в бассейны прибрежных акваторий дождевых и льяльных вод, а также фактами воздействия пробных, локальных апробационных загрязнений, моделируемых разработчиками. Данные выводы стали возможны в результате предметного разбора и анализа накопленных данных мониторинга качества морской воды на основании поведения гидробионтов. Первоначальная установка буйковой экостанции, включающая установку в индикативной географической точке якорного устройства весом до 700 кг, проведена с использованием возможностей специализированного научно-исследовательского судна АО «Концерн «Океанприбор». Регулярный технический контроль и обслуживание экостанции выполнялись с использованием средств маломерного флота. Опытным путем установлено, что созданные экостанции требуют периодического технического обслуживания не чаще 1 раза в 6 календарных месяцев. Указанная периодичность определяется не столько жизнеспособностью гидробионтов, сколько ресурсом блоков электропитания. Это факт позволяет искать дальнейшие пути увеличения ресурса буйковой экостанции.

Представленный в статье материал по созданию автоматизированной системы контроля экологического состояния акваторий бухт г. Севастополя является частным примером усилий предприятий гидроакустического приборостроения по диверсификации своего военно-экономического потенциала. Создаваемый проект автоматизированной системы по своим научно-технологическим и производственно-техническим возможностям экстерриториален и, в дальнейшем, может быть растиражирован на морские и пресноводные акватории России с минимальными техническими доработками. Дальнейшие работы по созданию систем для экологического контроля параметров водной среды, контроля воздействия на антропогенные или биологические факторы-загрязнения (не естественного изменения) указанной среды основанных на научных результатах современной гидроакустики и смежных научных дисциплинах требуют развития и соответствующих сервисов, создания информационной базы для поддержания функционирования разработанных приборов. Это объективно ведет к развитию информационных систем в сфере прибористики гражданского назначения.

### *Литература*

1. Перечень поручений Президента РФ В. В. Путина от 23 сентября 2016 г. №Пр-1845 (пп. 1 «г»), 2) по итогам совещания «О мерах по использованию потенциала оборонно-промышленного комплекса для выпуска высокотехнологичной продукции гражданского назначения, востребованной на внутреннем и внешнем рынках». [Электронный ресурс] - электронные данные, – режим доступа <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/57823>– дата доступа: январь 2022.
2. Перечень поручений по реализации Послания Президента РФ Федеральному Собранию РФ от 1 декабря 2016 г. от 5 декабря 2016 г. Пр-2346 (п. 1 «ж»). [Электронный ресурс] - электронные данные, – режим доступа <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/53425>– дата доступа: январь 2022.
3. Доклад Экспертного совета председателя коллегии Военно-промышленной комиссии РФ «Диверсификация ОПК: как побеждать на гражданских рынках». V Международный форум технологического развития «Технопром». Новосибирск. 2017. 20 с.
4. Перечень поручений Президента РФ от 17 февраля 2018 г. № Пр-288 по итогам совещания по вопросу диверсификации производства продукции гражданского назначения организациями ОПК. [Электронный ресурс] - электронные данные, – режим доступа <http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/53496>– дата доступа: январь 2022.
5. Доклад о целях и задачах Минпромторга России на 2019 год и основных результатах деятельности за 2018 год. Минпромторг РФ, апрель 2019 г. 155 с.
6. Мезенцева И. В., Мальченко Ю. А. Комплексный подход в организации мониторинга загрязнения морских вод в прибрежных акваториях Севастополя // Тр. гос. океанографического института. 2015. № 216. С. 326.
7. Трусевич В. В., Кузьмин К. А., Мишуков В. Ж. Мониторинг водной среды с использованием пресноводных двустворчатых моллюсков // Системы контроля окружающей среды. 2017. №. 7. С. 83–93.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ В СЛОЖНОЙ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКЕ

*Е. М. Грамузов*, д-р техн. наук, *Н. В. Калинина*, канд. техн. наук, *А. А. Куркин*, д-р физ.-мат. наук  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Россия

## MATHEMATICAL MODEL OF SHIP MOVEMENT IN DIFFICULT ICE CONDITIONS

*E. M. Gramuzov*, Dr.Sc., *N. V. Kalinina*, Ph.D., *A. A. Kurkin*, Dr.Sc.  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

*В работе рассмотрены этапы движения ледоколов и судов активного ледового плавания набегам в сложной ледовой обстановке, когда движение непрерывным ходом в сплошных льдах не представляется возможным. Основные этапы такого режима движения описаны дифференциальными уравнениями. Приведены решения этих уравнений. Представлена функция цели при оптимизации полного цикла движения. Проиллюстрирован расчет средней скорости движения набегам для различных судов.*

*The stages of icebreaker movement and ships of active ice navigation by ramming in a difficult ice situation are considered in the article. This is a mode of movement when continuous movement in solid ice is not possible. The main stages of this mode of motion are described by differential equations. Solutions of these equations are given. The goal function for optimizing the full cycle of movement is presented. The calculation of the average speed of movement by ramming for various ships is illustrated.*

**Введение.** Движение ледокола в сложной ледовой обстановке, когда толщина льда превышает предельную и невозможно непрерывным ходом, осуществляется набегам. Доля такой работы велика [1, 2]. Однако параметры движения, в частности длина разбега, выбираются судоводителями на основе интуиции и опыта работы и носят случайный характер. Анализ ходкости ледоколов при работе набегам [3] позволяет поставить вопрос об оптимизации тактики судовождения и рациональном проектировании ледоколов, рассчитанных преимущественно на такую работу. Возможности ледокола определяются его размерениями, формой корпуса и мощностью главной энергетической установки [2]. Для конкретного ледокола эти параметры фиксированы, поэтому для достижения максимальной скорости движения на первый план выступает тактика судовождения.

**Математическая модель движения ледоколов набегам.** На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан полный цикл движения ледокола, состоящий из ускоренного и замедленного отхода назад от неразрушенного льда после остановки, разбега в собственном канале и продвижения в сплошном ледяном поле. Это сложное движение состоит из этапов, которые описаны дифференциальными уравнениями. Решение этих уравнений получено в [1]. При ускоренном движении на заднем ходу:

$$t = \frac{1}{\sqrt{A_1 B_1}} \operatorname{Arth} \sqrt{1 - e^{(-2A_1 x)}}, \quad \dot{x} = \sqrt{\frac{B_1}{A_1}} \operatorname{th} (t \sqrt{A_1 B_1});$$

$$x(t) = -\frac{1}{2A_1} \ln [1 - \operatorname{th}^2 (t \sqrt{A_1 B_1})]; \quad \ddot{x} = \frac{B_1}{\operatorname{ch}^2 (t \sqrt{A_1 B_1})},$$
(1)

где  $t$  — время;  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$  — путь, скорость и ускорение судна;

$$A_1 = \frac{1.4 P u_{zx} + k_{1zx} v_0^2}{(1 + k'_{11}) D v_0^2}; \quad B_1 = \frac{P u_{zx} - k_{2zx}}{(1 + k'_{11}) D}.$$
(2)

Здесь  $P u_{zx}$  — тяга ледокола на швартовых на заднем ходу;  $v_0$  — скорость движения на чистой воде при заданной мощности;  $k'_{11}$  — коэффициент присоединенных масс воды и льда;  $D$  — водоизмещение;

$$k_{1xx, nx} = k_{ид} \left[ c_{и} \rho_{л} h \frac{B}{2} (\Phi_{и} + f \Phi_{пт}) + c_{г} \rho h \frac{B}{2} (\Phi'_{г} + f \Phi'_{пт}) \right]; \quad (3)$$

$$k_{2xx, nx} = k_{п} (\rho - \rho_{л}) g h b B (\Phi'_{п} + f \Phi'_{пт}),$$

где  $c_{и}$  — безразмерный коэффициент, учитывающий присоединенные массы воды в составе импульсного сопротивления льдин;  $\rho_{л}$ ,  $\rho$  — плотность льда и воды;  $h$  — толщина льда;  $B$  — ширина ледокола;  $f$  — коэффициент трения льда об обшивку ледокола;  $c_{г}$  — коэффициент гидродинамического сопротивления при раздвигании льдин;  $g$  — ускорение свободного падения;  $b$  — средняя протяженность обломков льда, зависящая от его толщины, как показывают наблюдения, она определяется изгибом пластин на упругом основании и приближенно может быть принята из соотношения  $b\alpha = 0,312$ ;  $\alpha = (\rho g/d)^{1/4}$  — параметр изгиба пластины на упругом основании;  $d = Eh^3/(12(1 - \mu^2))$  — цилиндрическая жесткость ледяной пластины;  $E$ ,  $\mu$  — модуль упругости и коэффициент Пуассона льда,  $k_{п}$ ,  $k_{ид}$  — эмпирические коэффициенты, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления. Функции  $\Phi_{и} \dots \Phi'_{пт}$ , характеризующие форму корпуса, различны для переднего и заднего хода [1].

Торможение задним ходом происходит за счет того, что тяга винтов ледокола равна нулю или направлена в сторону, противоположную движению ледокола. Время и путь торможения при движении задним ходом учитываются в расчете в зависимости от режима торможения. При ускоренном движении ледокола на переднем ходу решение имеет вид:

$$t = \frac{1}{\sqrt{A_3 B_3}} \text{Arth} \sqrt{1 - e^{(-2A_3 x)}}; \quad \dot{x} = \sqrt{\frac{B_3}{A_3}} \text{th} \left( t \sqrt{A_3 B_3} \right); \quad (4)$$

$$x(t) = -\frac{1}{2A_3} \ln \left[ 1 - \text{th}^2 \left( t \sqrt{A_3 B_3} \right) \right]; \quad \ddot{x} = \frac{B_3}{\text{ch}^2 \left( t \sqrt{A_3 B_3} \right)},$$

где

$$A_3 = \frac{1.4 P u_{nx} + k_{1nx} v_0^2}{(1 + k'_{11}) D v_0^2}; \quad B_3 = \frac{P u_{nx} - k_{2nx}}{(1 + k'_{11}) D}. \quad (5)$$

Здесь  $P u_{nx}$  — тяга ледокола на швартовых переднем ходу.

В результате разбега ледокол приобретает некоторую скорость  $v_p$ , с которой он внедряется в сплошной лед, продвигаясь до полной остановки. На этом этапе решение уравнения поступательного движения с учетом имеет вид:

$$t = -\frac{1}{\sqrt{A_4 B_4}} \text{arctg} \sqrt{\frac{C_{11} e^{(-2A_4 x)} - B_4}{B_4}} + C_{12}; \quad \dot{x} = \sqrt{\frac{B_4}{A_4}} \text{tg} \left( (C_{12} - t) \sqrt{A_4 B_4} \right);$$

$$x(t) = -\frac{1}{2A_4} \ln \left[ \frac{B_4}{C_{11}} \left\{ 1 + \text{tg}^2 \left( (C_{12} - t) \sqrt{A_4 B_4} \right) \right\} \right]; \quad \ddot{x} = -\frac{B_4}{\cos^2 \left( (C_{12} - t) \sqrt{A_4 B_4} \right)}; \quad (6)$$

$$C_{11} = B_4 + v_p^2 A_4; \quad C_{12} = \frac{1}{\sqrt{A_4 B_4}} \text{arctg} \sqrt{\frac{v_p^2 A_4}{B_4}},$$

где  $v_p$  — скорость ледокола, приобретенная в процессе разгона;

$$A_4 = \frac{1.4 P u_{nx} + k_3 v_0^2}{(1 + k'_{11}) D v_0^2}; \quad B_4 = -\frac{P u_{nx} - k_4}{(1 + k'_{11}) D}; \quad (7)$$

$$k_3 = k_{ov} \rho_l h B \left[ c_{и} (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}) + \frac{c_r \rho \Omega_l}{\rho_l B h} (\Phi_r + f \Phi_{рт}) \right];$$

$$k_4 = k_p \frac{h^4}{d\alpha} \left[ (1 + f \gamma_{лф}) + k_{сф} \gamma_{сф} \frac{d\alpha^2}{h} \sqrt{\frac{\text{tg} \varphi_{2ф}}{1 + \text{tg}^2 \varphi_{2ф}}} + 0.66(1 + f \Phi_{лг}) B \alpha + \frac{k_{сб} \Phi_c d\alpha^3 B}{h} \right] +$$

$$+ k_{ост} (\rho - \rho_l) g h \Omega_l (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}) + k_c g h_c \Omega_l (\Phi_{и} + f \Phi_{ит}),$$
(8)

где  $k_{сф} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}$ ;  $k_{сб} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}$ ;  $k_c = 0,3 \text{ т/м}^3$ ;  $\Omega_l$  — площадь подводной части корпуса, облегаемая льдом;  $k_p$ ,  $k_{ост}$ ,  $k_{ov}$  — эмпирические коэффициенты, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления;  $\gamma_{лф}$ ,  $\gamma_{сф}$ ,  $\Phi_{и} \dots \Phi_{ит}$  — функции, характеризующие форму корпуса ледокола в районе контакта со льдом [1].

В выражении (7)  $R_{и\text{пх}} < k_4$  и  $B_4$  принимает положительное значение. Это соответствует торможению ледокола вплоть до полной остановки во льду толщиной больше предельной. На каждом этапе движения ледовое сопротивление зависит от толщины и физико-механических свойств льда, скорости движения, размерений и формы корпуса ледокола. Частным случаем математической модели является непрерывное движение в сплошных льдах. Теоретически получена совокупность решений дифференциальных уравнений движения на каждом этапе [1]. Математические модели, содержащие неизбежные упрощения настраиваются на данные натуральных экспериментов. Особую сложность составляли подбор и анализ несистематизированных натуральных данных, полученных при пассивных (попутных) экспериментах. Для этих целей разработаны алгоритмы подбора и обработки экспериментальных данных [4]. Получены расчетные зависимости параметров движения ледокола на каждом этапе. Из совокупности решений дифференциальных уравнений получена математическая модель средней скорости движения набегам в зависимости от длины отхода ледокола [5]. Продвижение в сплошном льду существенно зависит от скорости (кинетической энергии) вхождения в сплошной лед. Однако, для разгона ледокола требуется некоторый путь, определяемый его тягой и сопротивлением движению в канале битого льда. Пройденное расстояние определяется только продвижением в сплошном льду, а время на его преодоление суммарным временем на выполнение всех маневров. Поэтому средняя скорость движения ледокола набегам определяется выражением:

$$v_{и} = \frac{l_{и}}{t_{от} + t_{зп} + t_p + t_{и} + t_{пз} + t_{ос}},$$
(9)

где  $l_{и}$ ,  $t_{и}$  — путь и время движения в сплошном льду,  $t_{от}$  — время отхода ледокола до начала реверса ледокола;  $t_{зп}$  — время реверса ледокола с заднего хода на передний;  $t_p$  — время разбега;  $t_{пз}$  — время реверса ледокола с переднего хода на задний;  $t_{ос}$  — время освобождения от заклинивания.

**Оптимизация работы ледоколов набегам.** Особый интерес представляет оптимизация полного цикла движения. В качестве функции цели может выступать максимальная средняя скорость движения за цикл. Полезный путь продвижения определяется только этапом движения в сплошном ледяном покрове на переднем ходу. Суммарное затраченное время складывается из затраченного времени на всех этапах движения. В качестве примера проиллюстрирован расчет средней скорости движения для двух проектов судов [6, 7]: танкера ледового класса проекта Р-70046 (рис. 1, а) и ледокольного буксира проекта 2805 «Невская застава» в разных толщинах льда (рис. 1, б). Основные характеристики судов приведены в табл. 1. Из рис. 1 видно, что средняя скорость движения ледокола за цикл в зависимости от длины разбега для всех толщин льда имеет максимум. Изменение средней скорости движения при увеличении длины разбега имеет различный характер. Если при возрастании длины разбега до оптимальной средняя скорость растет интенсивно, то при дальнейшем увеличении длины разбега происходит довольно плавное снижение средней скорости. То есть, при некотором увеличении длины разбега сверх оптимальной средняя скорость остается близкой к оптимальной. Это дает свободу для выбора длины разбега судоводителю и подтверждается экспериментальными данными по работе ледоколов набегам.

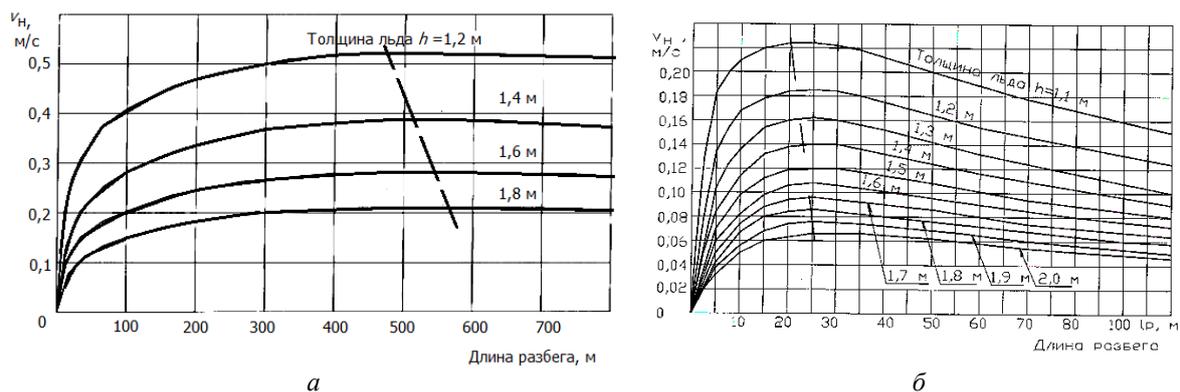


Рис. 1. Зависимости скорости движения набегамии от длины разбега судна во льдах различной толщины.

*a* — танкер пр. P-70076; *б* — буксир пр. 2805.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Таблица 1

Основные характеристики судов активного ледового плавания

|    | Основные характеристики                   | Арктический танкер дедвейтом 70000 т | Ледокольный буксир проекта 2805 «Невская застава» |
|----|-------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1. | Ледовый класс                             | Судно ледового плавания Arc 6        | ✳М-СП 3,5 (ледокол) А                             |
| 2. | Длина между перпендикулярами $L_{пп}$ , м | 232,80                               | 38,0                                              |
| 3. | Ширина судна $B$ , м                      | 35                                   | 11,8                                              |
| 4. | Высота борта $H$ , м                      | 25,6                                 | 5,2                                               |
| 5. | Осадка по грузовую ватерлинию $T$ , м     | 13,9                                 | 3,8                                               |
| 6. | Водоизмещение $D$ , т                     | 92407                                | 912                                               |
| 7. | Мощность главного двигателя $N$ , кВт     | 18530                                | 2×1800                                            |
| 8. | Скорость на чистой воде, уз.              | 18,5                                 | 9,7                                               |

При увеличении длины разбега сверх оптимальной увеличивается продвижение за один цикл, следовательно, уменьшается число циклов на единицу пути. Это может положительно сказаться на моторесурсе энергетической установки из-за уменьшения числа реверсов. Таким образом, встает вопрос технико-экономического обоснования оптимальной тактики движения набегамии. На основе проведенных расчетов получены рекомендации для судоводителей по выбору оптимальной тактики работы ледоколов набегамии в зависимости от толщины и физико-механических характеристик ледяного покрова. Расчеты могут производиться для любого конкретного ледокола, характеризуемого водоизмещением, главными размерениями, формой корпуса в местах контакта со льдом, мощностью и параметрами движительно-рулевого комплекса. Математическая модель средней скорости движения набегамии позволяет анализировать влияние формы корпуса и соотношений главных размерений на эффективность работы. Полученные математические модели могут быть использованы в проектных организациях на начальных этапах проектирования ледоколов, в научно-исследовательских организациях при проведении собственных исследований, в речных пароходствах при выборе тактики работы ледоколов в тяжелых ледовых условиях.

*Литература*

1. Ионов Б. П., Грамузов Е. М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2001.
2. Ионов Б. П., Грамузов Е. М., Зуев В. А. Проектирование ледоколов. СПб.: Судостроение, 2013.
3. Сазонов К. Е. Оценка предельной толщины льда, преодолеваемой ледоколом при работе набегамии // Судостроение. 2017. № 4(833). С. 9–10.
4. Грамузов Е. М., Зуев В. А., Калинина Н. В., Куркин А. А. Использование данных натурных экспериментов для построения полуэмпирической модели движения ледокола набегамии // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Математическое моделирование физических процессов». 2021. № 4. С. 83–90.
5. Ионов Б. П., Калинина Н. В. Выбор тактики движения судов в тяжелых льдах // Морской вестник. 2013. № 1(45). С. 106–108.
6. Калинина Н. В. Прогнозирование ледовой ходкости буксира ледокольного класса пр. 2805 / Морской вестник. 2008. № 1(25). С. 96–97.
7. Калинина Н. В. Исследование ледопроеходимости танкера арктического ледового плавания дедвейтом около 70000 тонн // Тр. конф. «Современные технологии в кораблестроительном и энергетическом образовании, науке и производстве». 2006. С. 131–135.

Представленные результаты получены при поддержке гранта РФФ № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ

*Д. Л. Винокуров*, канд. физ.-мат. наук

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

## MODERN METHODS OF ACOUSTIC INTENSIMETRY FOR ESTIMATION OF NOISE POLLUTION OF THE ENVIRONMENT

*D. L. Vinokurov*, Ph.D.

N. E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

*Рассмотрены физические основы и принципы измерения акустической интенсивности. Проведен анализ методов акустической интенсивиметрии. Обсуждены требования к измерительной аппаратуре при измерениях акустической интенсивности. Рассмотрены особенности векторных и оптоволоконных приемников звука, делающие их перспективными для применения в интенсивиметрических измерениях.*

*Basic physics and measurement principles of acoustic intensity are examined. Analysis of acoustic intensity methods is performed. Requirements for measuring acoustic intensity using measuring equipment are discussed. Features of vector and fiber-optic sound receivers that make them perspective for measuring of intensimetry are examined.*

В связи с развитием промышленности, наземного и морского транспорта в течении последних десятилетий резко возросла акустическая загрязненность территории. Это оказывает отрицательное воздействие на здоровье человека и морских животных. В решении проблемы снижения шума важным является объективный контроль уровня акустической загрязненности, который наилучшим образом осуществляется с помощью интенсивметра, позволяющего определить направление на источник шума, его частотные характеристики, измерить интенсивность звука, градиент звукового давления. Это позволяет правильно выбрать методику оценки шума и сравнить измеренный уровень звукового давления с предельно допустимым по таблицам [1].

Информация об источнике звука, позволяет решать проблемы звуковой пеленгации искусственных и естественных источников низкочастотного звука и охраны окружающей среды. В настоящее время широкое распространение получили методы исследования звуковых полей, основанные на определении энергетических параметров акустического поля, которые содержат информацию как о величине, так и о направлении на источник звука. Энергетические параметры поля эффективны при выявлении, идентификации и локализации источников звука. Энергетический подход для диагностики источников низкочастотного звука является перспективным направлением гидроакустики и аэроакустики.

В соответствии со стандартом под шумами понимаются звуковые процессы в воспринимаемом человеческим ухом диапазоне частот от 16 Гц до 16 кГц, не носящие направленного характера. Возможные источники шума в бытовых помещениях чрезвычайно разнообразны. Это может быть бытовой шум, который разделяют на воздушный и ударный. Источниками воздушного шума являются: человеческий голос, работа звуковоспроизводящей аппаратуры, бытовой техники, игра на музыкальных инструментах и т.д. Указанные источники излучают звуковую энергию в воздух помещения. Она достигает конструкций здания, распространяясь в виде воздушных звуковых волн.

Ударные шумы возникают в результате динамического воздействия твердого тела на конструкцию или другой элемент здания (ходьба, передвижка мебели, падение предметов, удары и т.д.). Вызванные этим колебания конструкций приводят к излучению воздушного шума. Источником шума в бытовых помещениях может быть производственный шум, вызванный работой близкорасположенного промышленного предприятия, транспортный шум, шум крупных вентиляционных силовых установок. Отметим, что современные крупногабаритные установки часто являются источниками низкочастотного звука, который почти невозможно изолировать, т.к. звукопоглощающие материалы малоэффективны на низких частотах. Поэтому

единственный путь борьбы с низкочастотным звуком — выявление местоположения источников и разработка мер по их подавлению. Северные моря России до настоящего времени являются наиболее экологически чистыми районами, однако бурно начавшееся освоение нефтегазовых месторождений и увеличение объемов торгового судоходства в этих районах требует строгого экологического контроля различных видов загрязнений, и в частности, акустического загрязнения. Антропогенная деятельность в морской среде вносит существенный вклад в океанический шумовой фон, и этот вклад может значительно превышать акустические шумы естественного происхождения в прибрежных водах и мелководных морях. Человек может вносить шумы в морскую среду умышленно, для достижения какой-либо конкретной цели (такой как сейсмическая разведка, гидролокация), или непреднамеренно, в качестве побочного эффекта той или иной деятельности (судоходство, строительство, морское бурение и т. д.).

Несмотря на недостаток информации о точных уровнях антропогенных шумов, которые могут принести вред морским животным, в настоящее время принимаются меры по минимизации антропогенного шумового воздействия на морское биоразнообразие. Для снижения уровня антропогенного шума в конкретной акватории требуется регулярный мониторинг текущего уровня акустического шума, выявление его источников, определение превышения уровня шума над опорным, формирование конкретных рекомендаций по необходимому снижению шума. Для реализации технологии гидроакустического мониторинга «акустического загрязнения» акватории на морском шельфе и определения вклада каждого источника единственной возможностью является использование интенсивметрии на базе векторных гидроакустических приемников. Целью данной работы является анализ параметров существующих векторных приемников, которые определяют качество интенсивметрии. Для реализации метода необходима разработка акустических приборов, с помощью которых можно локализовать источник низкочастотного звука (определить направление на источник, расстояние до него), определить мощность излучения и оценить его опасность.

**Методы определения интенсивного звука.** Существует несколько методов определения интенсивности звука:

– уравнение Эйлера — в этом случае измеряют звуковое давление и градиент звукового давления, т.е. темп его изменения в зависимости от расстояния. Результат измерения градиента подставляют в уравнение Эйлера. Его решение дает колебательную скорость частиц, усредненное произведение которой с величиной звукового давления определяет интенсивность звука;

– конечно-разностная аппроксимация — в этом случае градиент звукового давления измеряют с помощью зонда с двумя микрофонами, разнесенными на близкое расстояние, в результате чего можно получить кусочно-линейную аппроксимацию функции, соответствующей градиенту давления. Для этого определяют два значения давления, затем их разность делят на расстояние между микрофонами зонда. Затем полученный градиент интегрируют, что дает колебательную скорость частиц. Мгновенные значения колебательной скорости умножают на мгновенные значения звукового давления, после чего полученное произведение усредняют по времени и получают значение интенсивности звука.

Интенсивметрия широко применяется в строительстве. Ее используют для разработки эффективных методов звукоизоляции и шумоподавления. В строительной и архитектурной акустике применяются два метода интенсивметрии: основанный на звуковом давлении и основанный на интенсивности звука. В настоящее время хорошо изучены и получили широкое распространение в гидроакустике пьезокерамические чувствительные элементы [2]. Их главными недостатками являются большие массогабаритные параметры, сложность объединения их в комплексы (сложность их мультиплексирования) [3], высокая чувствительность к электромагнитному воздействию и небольшая акустическая чувствительность по сравнению с оптоволоконными гидрофонами.

Рассмотрим несколько типов аппаратной реализации интенсивметров.

**Интенсивметр на двухразнесенных на близкое расстояние микрофонах.** Комплект оборудования для проведения интенсивметрии в общем случае включает в себя интенсивметрический зонд, анализатор и калибратор. Интенсивметрический зонд представляет из себя два микрофона, закрепленных на жесткой распорной раме лицевыми сторонами друг против друга. В зависимости от исследуемого диапазона частот микрофоны располагаются на

расстоянии 6, 12 или 50 мм друг от друга. Диапазон измеряемых частот — от 26 до 1250 Гц. Такие устройства нашли широкое применение в аэроакустике.

**Пьезоэлектрический ВЧ интенсиметр на моноблочном пьезоэлектрическом кольце.**

В этом случае давление и градиент давления измеряют с помощью одного пьезоэлектрического кольца с секционированным специальным образом внутренним электродом. Секционирование позволяет реализовать два ортогональных канала колебательной скорости и один канал давления (рис. 1–3; табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики [5]

|                                                                                    |      |
|------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Диапазон рабочих частот, кГц                                                       | 3–30 |
| Точность определения направления, град                                             | 5    |
| Чувствительность (осевая) V канала PV гидрофона на частоте 20 кГц, не менее, мВ/Па | 5    |
| Чувствительность P канала PV гидрофона в рабочей полосе частот, не менее, мВ/Па    | 10   |
| Собственная резонансная частота, кГц                                               | 30   |
| Диаметр, мм                                                                        | 40   |
| Высота, мм                                                                         | 40   |
| Вес на воздухе, г                                                                  | 320  |

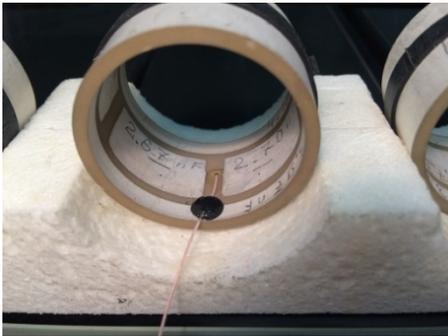


Рис. 1. Чувствительный элемент.



Рис. 2. ВЧ интенсиметрический зонд.

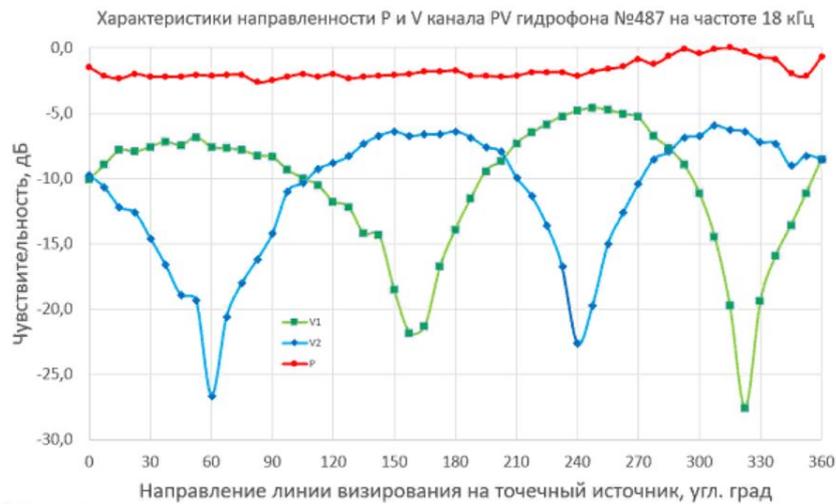


Рис. 3. Характеристики направленности.

P — характеристика направленности канала давления; V1, V2 — характеристики направленности ортогональных каналов скоростей.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**Пьезоэлектрический НЧ интенсиметр.** В этом случае градиент давления и давление измеряют с помощью пьезоэлектрических акселерометров с взаимно ортогональными осями и расположенного на близком расстоянии приемника давления (рис. 4–6; табл. 2). В приемниках с соколеблющимся корпусом сила, действующая на чувствительный элемент, обусловлена перемещением корпуса относительно «неподвижной» измерительной массы. Колебательная скорость корпуса приемника пропорциональна колебательной скорости в плоской бегущей волне.

Таблица 2

Технические характеристики [5]

|                                                                                                                   |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Диапазон рабочих частот по уровню 3 дБ, Гц                                                                        | 2–800    |
| Точность определения направления, град                                                                            | 3        |
| Чувствительность (осевая) канала приемника градиента давления на частоте 250 Гц, не менее, мкВ/Па (без усилителя) | 100      |
| Чувствительность Р канала РV гидрофона в рабочей полосе частот, не менее, мкВ/Па (без усилителя)                  | 100      |
| Собственная резонансная частота приемника градиента давления, кГц                                                 | 2        |
| Коэффициент деления на частоте 250 Гц, дБ не менее                                                                | 35       |
| Габаритные размеры сферического корпуса, мм                                                                       | 120      |
| Напряжение питания усилителя двухполярное, В                                                                      | $\pm 12$ |



Рис. 4. НЧ интенсиметрический зонд.



Рис. 5. Чувствительные элементы.

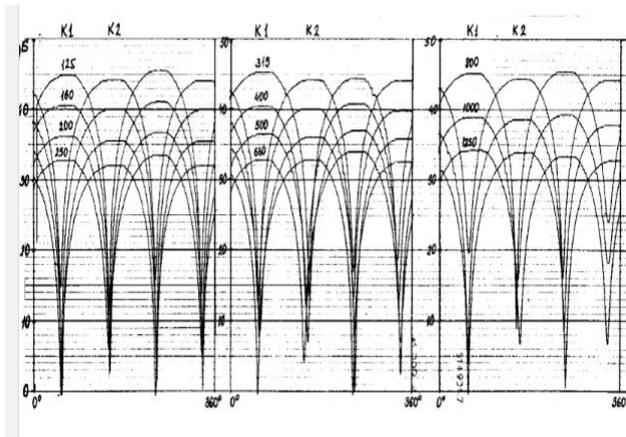


Рис. 6. Характеристики направленности (ХН) двух ортогональных каналов градиента давления.

По горизонтальной оси — угол поворота в градусах; по вертикальной оси — выходной сигнал в дБ относительно минимального значения; в качестве параметра около ХН указана частота в Гц.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

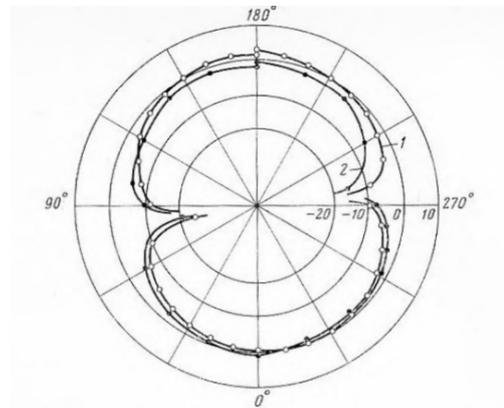


Рис. 7. Зависимость интенсивности от направления оси приемника [6].

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

**Оптоволоконный интенсиметр.** Волоконно-оптические датчики обладают рядом преимуществ по сравнению с пьезокерамическими чувствительными элементами. Они обладают лучшими метрологическими параметрами, имеют более выгодные весогабаритные характеристики, малое энергопотребление, независимость от влияния электромагнитного поля, передача сигналов с помощью света отсутствие необходимости в электропитании выносных датчиков. Все эти преимущества делают оптоволоконные датчики более перспективными для использования, в распределенных системах контроля. При воздействии звука на среду, в которой распространяется свет, происходит изменение оптической длины пути света, что приводит к изменению фазы световой волны. Это изменение фазы может быть зарегистрировано обычными интерферометрическими методами. В общем случае звуковое поле оказывает сложное воздействие на световую волну, вызывая ее амплитудную, поляризационную и частотно-фазовую модуляцию. Подобное воздействие звук оказывает, вообще говоря, на любую среду. Однако световоды особенно удобно использовать для регистрации звука, поскольку вследствие малых оптических потерь можно обеспечить большую длину акустооптического взаимодействия. В любых оптоволоконных датчиках оптическое волокно может служить либо средой для передачи информации, либо чувствительным элементом. В последнем случае датчик обычно строится на основе оптоволоконного интерферометра, одно волокно, в котором служит сигнальным плечом, а другое — опорным. В работе [6] было показано, что расхождение между измеренными характеристиками с помощью пьезоэлектрических гидрофонов и оптоволоконного преобразователя не превышает ошибки эксперимента (рис. 7), что свидетельствует об удовлетворительном совпадении результатов измерений, выполненных с помощью различных технических средств. Коэффициент деления в рабочей полосе частот составляет не менее 30 дБ, что обеспечивает точность определения направления прихода акустического сигнала не более 3 градусов.

**Заключение.** Рассмотрены особенности приемников звука, делающих их перспективными для применения в интенсиметрических измерениях. Описанные в работе интенсиметры разных типов позволяют осуществлять контроль акустического загрязнения в широком диапазоне частот от единиц герц до десятков килогерц.

#### *Литература*

1. Международный стандарт ISO 1996-1:2003 Шум. Описание, измерение и оценка шума на местности Часть 1. «Основные величины и процедуры оценки» (Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures, NEQ)
2. Рыбьянец А. Н., Сахненко В. П. Современное состояние и перспективы развития пьезоэлектрической керамики за рубежом // Микросистемная техника. 2002. № 3. С. 16–22.
3. Варжель С. В., Куликов А. В., Брунов В. С., Асеев В. А. Метод понижения коэффициента отражения волоконных брэгговских решеток с помощью эффекта фотохромизма // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1(77). С. 151–152.
4. ООО “АСМ тесты и измерения” [Электронный ресурс] // Интенсиметрические зонды. 2021. URL: <http://asm-tm.ru/category/catalog/bruel-and-kjaer/datchiki/intensimetricheskie-zondy> (дата обращения: 23.04.2021).
5. ООО “НПП Акма” [Электронный ресурс] // Линейка приемников градиента давления. 2021. URL: <http://www.npo-akma.ru/pgr.shtml> (дата обращения: 23.04.2021).
6. Лямшев Л. М., Смирнов Ю. Ю. Оптоволоконный интенсиметр // Акуст. жур. 1989. Т. 35, № 6. С. 1087–1092.

## ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ НАМАГНИЧИВАЕМЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ

Б. М. Кондратенко, д-р техн. наук, А. В. Стрижов

НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА», Санкт-Петербург, Россия

## MUTUAL INFLUENCE OF MAGNETIZED FERROMAGNETIC BODIES

B. M. Kondratenko, Dr.Sc., A. V. Strizhov

Research Institute of Shipbuilding and Armament of Navy «Naval Academy», St. Petersburg, Russia

*В практике судового магнетизма существует проблема оценки взаимного влияния намагничиваемых ферромагнитных тел. Одним из возможных путей теоретической оценки взаимного влияния является способ магнитных сопротивлений и фиктивного источника. Статья посвящена изложению этого метода. Приведены результаты численных оценок системы намагничиваемых сферидальных оболочек.*

*In the practice of ship magnetism, there is a problem of assessing the mutual influence of magnetized ferromagnetic bodies. One of the possible ways to theoretically assess the mutual influence is the method of magnetic resistances and a fictitious source. The article is devoted to the presentation of this method. The results of numerical estimates of the system of magnetizable spheroidal shells are presented.*

В практике судового магнетизма существует проблема оценки взаимного влияния ферромагнитных изделий, намагничиваемых магнитным полем Земли. Подобные проблемы существуют при поиске намагничиваемых объектов, находящихся на грунте морской акватории, а также при решении задач дефектоскопии металлических конструкций. Задача определения взаимного влияния намагниченных тел может быть сформулирована как задача расчёта параметров магнитного поля тела, намагничиваемого неоднородным магнитным полем, создаваемым другим намагниченным телом. При решении задачи определения взаимного влияния намагниченных тел ограничимся случаем изотропных ферромагнитных тел с постоянной магнитной восприимчивостью, намагниченность которых удовлетворяет уравнению

$$\operatorname{div} \vec{j}(x) = 0. \quad (1)$$

Обозначим коэффициент обратного действия взаимодействующих тел как

$$W_j^i = \frac{\vec{H}_j^i}{\vec{H}^i}, \quad (2)$$

где  $\vec{H}^i$  — вектор напряжённости магнитного поля одиночного тела;  $\vec{H}_j^i$  — вектор напряжённости магнитного поля другого тела;  $j=1; 2$ ;  $i=1; 2$ .

Суммарное поле взаимодействующих тел можно представить в виде

$$\vec{H} = \sum W_j^i \vec{H}^i. \quad (3)$$

Вычисление выражений (2), (3) может быть произведено после решения краевой задачи, которая формулируется уравнениями

$$\Delta^2 \Psi = 0, \quad (4)$$

$$\vec{H} = \operatorname{grad} \Psi, \quad (5)$$

$$\Psi^+ = \Psi^-, \quad (6)$$

$$\mu_0 + \frac{d\Psi^+}{dn} = \mu_0 \frac{d\Psi^-}{dn}. \quad (7)$$

Здесь соотношения (6), (7) представляют краевые условия для потенциала в области тела, занятой ферромагнитным веществом, и во внешней среде.

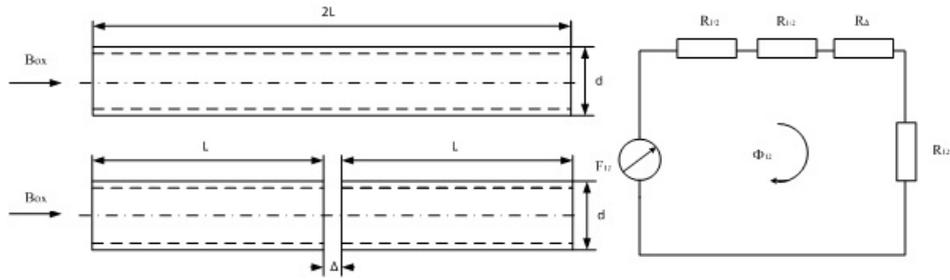


Рис. 1. Цилиндрические оболочки и эквивалентная электрическая схема магнитной цепи с магнитным разрывом.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Рассматривая приближённые методы решения поставленной задачи, сошлёмся на довольно обширную литературу, посвящённую этой проблеме [1–6]. Анализ литературных источников показал, что существующим методам в той или иной степени присущи ограничения, прежде всего, в точности расчётов, а также технические трудности аппроксимации изделий, подлежащих расчёту, координатными поверхностями одной из криволинейных систем координат, особенно в многосвязной области тел. Для устранения этих недостатков предлагается способ магнитных сопротивлений и фиктивного источника, в основу которого положены следующие физические предпосылки. Намагниченное тело создаёт поток магнитной индукции, замыкающийся через окружающее пространство в стенке тела. При внесении в зону потока ферромагнитного тела поток будет замыкаться и через него, образуя магнитную цепь. Магнитное сопротивление потоку будет определяться сопротивлением окружающего пространства  $R_{12}$ , а также зазора  $R_{\Delta}$ , разделяющего тела, и сопротивлением  $R_{ж1/2}$  материала стенки тела. На рис. 1 приведена используемая далее расчётная схема, разделённых зазором двух цилиндрических оболочек, намагничиваемых горизонтальным магнитным полем Земли  $B_{0x}$ , и эквивалентная электрическая схема магнитной цепи взаимодействующих оболочек. На рис. 1:  $\Phi_{12}$  — поток индукции, возбужденный в стенках цилиндрической оболочки с магнитным разрывом;  $R_{1/2}$  — магнитное сопротивление стенки, половинной оболочки;  $R_{\Delta}$  — магнитное сопротивление зазора, образованного магнитным разрывом;  $F_{12}$  — эквивалентная магнитодвижущая сила, возбуждающая поток индукции в стенках половинных цилиндрических оболочек при магнитном разрыве. Уравнение эквивалентной электрической схемы

$$E_{12} = I_{12}(R_{12} + R_{\Delta} + R_{ж1/2}), \quad (8)$$

где  $I_{12}$  — ток, эквивалентный потоку индукции, замыкающемуся между торцами оболочек;  $E_{12}$  — эдс, эквивалентная мдс, возбуждающей поток индукции.

Обозначим мдс  $F' = \Phi_{12}R_{\Delta}$  и назовём её мдс фиктивного источника. Окончательно

$$F' = F_{12} - \Phi_{12}(R_{12} + R_{ж1/2}). \quad (9)$$

Примем мдс  $F_{12}$ , равной мдс, возбуждающей поток в исходной цилиндрической оболочке, когда зазор отсутствует. Введём понятие фиктивного источника индукции, принятого в виде горизонтального магнитного диполя, расположенного на продольной оси оболочек между ними. Направление вектора дипольного момента примем согласным с направлением вектора намагниченности оболочек. Мдс, создающая фиктивный источник, стремится, при изменении величины зазора, к максимальному значению при  $\Delta = 0$ . Функцию  $\Phi_{12}(R_{12} + R_{ж1/2})$ , зависящую от расстояния между оболочками (телами), назовём внутренним падением мдс фиктивного источника, её величина стремится к нулю при  $\Delta = \infty$ . Определив мдс фиктивного источника, можно определить величину момента фиктивного источника и рассчитать величину индукции поля, создаваемого им.

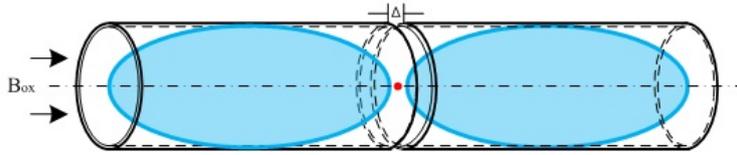


Рис. 2. Схема сфероидальных оболочек, вписанных в цилиндрические оболочки.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Условившись считать, что суммарное магнитное поле двух намагниченных оболочек определяется суперпозицией полей каждой из оболочек и поля фиктивного источника, получим простую расчётную схему. По этой схеме для определения величины индукции взаимодействующих цилиндрических оболочек необходимо рассчитать в заданной точке индукцию поля, создаваемого каждой из оболочек и фиктивного источника и сложить их. Видно, что задача определения взаимного влияния намагниченных однородным полем цилиндрических оболочек в принятой формулировке в значительной степени сводится к определению магнитного сопротивления (магнитной проводимости) между оболочками. Расчёт магнитной проводимости (сопротивления) в силу математической аналогии описания электрического и магнитного полей может быть сведён к расчёту электрической ёмкости  $C$  в соответствии с формулой

$$G_M = \frac{1}{R_M} = \frac{\mu_0}{\varepsilon} C, \quad (10)$$

где  $R_M$  — магнитное сопротивление;  $\varepsilon$  — электрическая проницаемость среды;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость среды.

Методы расчёта электрической ёмкости достаточно разработаны, применительно к рассматриваемой задаче воспользуемся данными [7, 8]. Из формулы (10) видно, что для расчёта требуется знание величин потоков магнитной индукции, создаваемых взаимодействующими цилиндрическими оболочками, а также оболочки, образуемой из двух коротких (половинных) оболочек. Аппроксимируем цилиндрические оболочки сфероидальными оболочками, исходя из равенства объёмов металла оболочек. На рис. 2 представлена схема оболочек с вписанными сфероидальными оболочками, разделенными зазором  $\Delta$ . На рис. 2 горизонтальная составляющая напряжённости магнитного поля сфероидальной оболочки, намагничиваемой полем с индукцией  $B_{ox}$ , имеет вид [9, 10]:

$$X_X = \mu_{a1} \frac{A_{1x}}{c} \left[ \frac{\xi}{\xi^2 - \eta} - \frac{1}{2} \ln \frac{\xi + 1}{\xi - 1} \right], \quad (11)$$

здесь  $A_{1x} = \frac{\Delta A_{1x}}{\Delta_x}$ ,

где

$$\Delta A_{1x} = (\mu_2 - 1) c \frac{B_{ox}}{\mu_0} \{ \mu_2 P_{10}(\xi_1) P_{10}(\xi_2) \times [P'_{10}(\xi_1) Q'_{10}(\xi_2) - P'_{10}(\xi_2) Q'_{10}(\xi_1) + P'_{10}(\xi_1) P'_{10}(\xi_2)] \times [P_{10}(\xi_2) Q_{10}(\xi_1) - P_{10}(\xi_1) Q_{10}(\xi_2)] \}; \quad (12)$$

$$\Delta_x = -(\mu_2 - 1)^2 P_{10}(\xi_2) P'_{10}(\xi_2) Q_{10}(\xi_2) Q'_{10}(\xi_1) + [\mu_2 Q_{10}(\xi_1) P'_{10}(\xi_1) - P_{10}(\xi_1) Q'_{10}(\xi_1)] \times [\mu_2 P_{10}(\xi_2) Q'_{10}(\xi_2) - P'_{10}(\xi_1) Q_{10}(\xi_2)], \quad (13)$$

где  $P_{nm}(\xi_2), P_{nm}(\eta)$  — присоединенные функции Лежандра первого рода;  $Q_{nm}(\xi_2)$  — присоединенные функции Лежандра второго рода.

Магнитный поток продольно намагниченной сфероидальной оболочки равен

$$\Phi_x = 2,7 \mu_0 A_{1x} c. \quad (14)$$

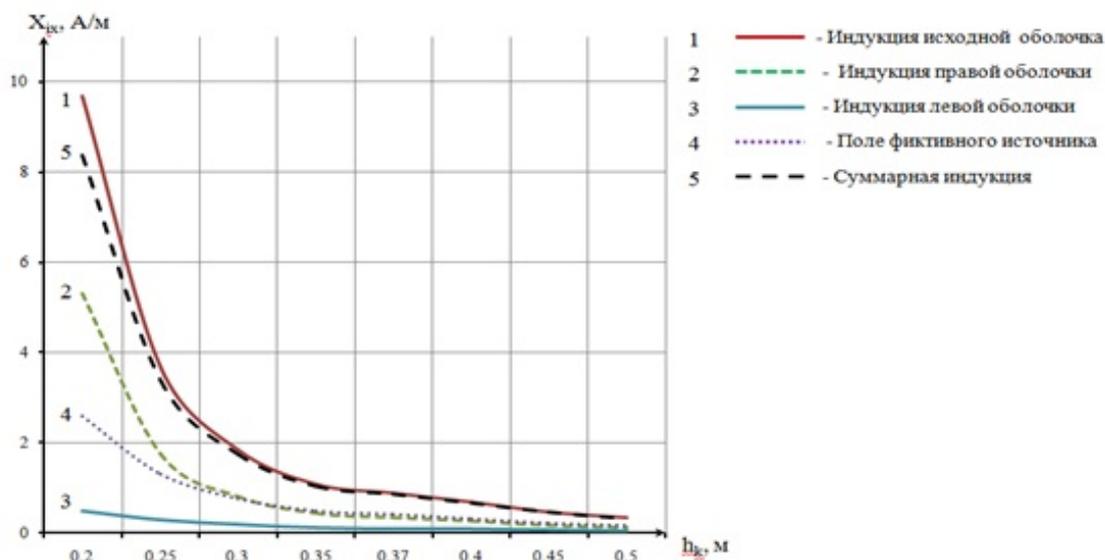


Рис. 3. Зависимость продольной составляющей  $X_{ix}$  поля индуктивного продольного намагничивания оболочек от координат точки наблюдения.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Мдс, возбуждающая поток индукции длинной цилиндрической оболочки равен

$$F_{12} = \Phi_x (R_{12} + R_{ж}). \tag{15}$$

Здесь  $\Phi_x$  — поток индукции длинной оболочки, намагничиваемой полем  $B_{ох}$ ;  $R_{12}$  — магнитное сопротивление окружающей среды потоку;  $R_{ж}$  — магнитное сопротивление материала оболочки потоку индукции. Определив необходимые параметры, рассчитывается мдс фиктивного источника. Принято, что она создается одновитковым контуром, расположенным по середине сфероидальной оболочки, площадь контура которого  $S$  равна поперечному сечению оболочки. Таким образом, магнитный момент фиктивного источника – горизонтального магнитного диполя равен

$$M = I_{12} S. \tag{16}$$

Разместив диполь между оболочками в центре зазора, можно рассчитать поле создаваемого им в заданной точке. На рис. 3 приведены зависимости индукции магнитного поля оболочек, фиктивного источника (горизонтального магнитного диполя), суммарного поля создаваемого оболочками и фиктивным источником. Расчеты производились для сфероидальных оболочек, габариты которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные параметры сфероидальных оболочек и намагничивающего поля

| Исходная оболочка |      | Половинные оболочки |                    |                    |                    | Толщина стенки | Относительная магнитная проницаемость материала стенок | Напряженность магнитного поля Земли |
|-------------------|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| a, м              | b, м | a <sub>1</sub> , м  | b <sub>1</sub> , м | a <sub>2</sub> , м | b <sub>2</sub> , м |                |                                                        |                                     |
| 16                | 5    | 8                   | 5                  | 8                  | 3                  | 10; 12; 14     | 150                                                    | $H_z$ , А/м                         |
| 0,28              | 0,08 | 0,14                | 0,08               | 0,14               | 0,053              | 1; 1,2         | 170                                                    | 38                                  |

Расчетные точки располагаются на продольной оси оболочек, на рис. 2 справа от торца оболочки. Видно, что две половинных оболочки, разделенные зазором  $\Delta$ , создает поле, индукция которого меньше индукции длинной (исходной) оболочки. В расчетных точках величина

индукции на 70 % определяется полем оболочки, расположенной ближе к расчетной точке. Поле фиктивного источника (взаимного влияния) создает индукцию, величина которой составляет приблизительно 30 % от индукции, создаваемой оболочкой, расположенной ближе к расчетной точке.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- 1) предложенный способ магнитных сопротивлений и фиктивного источника позволяет выполнять оценку взаимного влияния намагничиваемых тел;
- 2) взаимное влияние, в рассмотренном случае, по индукции взаимодействующих тел достигла величины примерно около 30 %, что необходимо учитывать при решении практических задач.

#### *Литература*

1. Бурцев Г. А. О коэффициентах размагничивания и взаимодействия в системе ферромагнитных стержней // Дефектоскопия. 1970. № 1.
2. Глухов В. П., Дроздов В. А., Шмидт Р. К., Метод расчета проводимости магнитной цепи, состоящей из нескольких ферромагнитных областей и воздушных промежутков // Латвийский физико-технический журнал. Рига. 1992. № 2.
3. Блох Ю. И. Взаимное влияние намагничивающих круговых цилиндров // Геология и разведка. 1974. № 3.
4. Шоффа В. Н., Ростовцева А. К. Анализ магнитного поля магнитных систем с несколькими последовательными зазорами // Изв. ВУЗов «Электромеханика» 1990. № 2.
5. Филатов В. В. Магниторазведка: магнитная восприимчивость, индуцированная и естественная остаточная намагниченности: научное издание / Под ред. В. В. Филатов; Урал. гос. горный ун-т. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008.
6. Винничук Н. Н., Костров Н. П., Ратушняк А. Н. Применение объемных интегральных уравнений в задачах магнитометрии. Екатеринбург: УрО РАН, 1999.
7. Иоссель Ю. Я., Струнский Э. Г. Об оценке емкости уединенных проводников, имеющих форму тел вращения // Электричество. 1981. №8.
8. Иоссель Ю. Я. Кочанов Э. С., Струнский Э. Г., Расчет электрической емкости, Л., Энергоиздат, 1981.
9. Richards T. C. Transversely Magnetized Oblate Spheroids // Defence R&D Canada –Atla. 2005. Vol. 12.
10. Розов В. Ю., Гетьман А. В., Кильдишев А. В., Пространственный гармонический анализ внешнего магнитного поля протяженных объектов в вытянутой сфероидальной системе координат // Техническая электродинамика. 1999. № 1.

## О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

*В. П. Щеголихин, д-р техн. наук*

НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА», Санкт-Петербург, Россия

## ON THE POSSIBILITY OF REDUCING THE INTENSITY OF CAVITATION NOISE EMISSION OF PROPELLERS

*V. P. Shchegolikhin, Dr.Sc.*

Research Institute of Shipbuilding and Armament of Navy «Naval Academy», St. Petersburg, Russia

*Рассмотрена возможность снижения кавитационного шумоизлучения гребных винтов за счет обеспечения условий их бескавитационной работы, путем поддержания температуры пограничного слоя потока воды в заданных пределах.*

*In the paper the possibility of reducing the cavitation noise emission of propellers by providing the conditions for their cavitation-free operation by maintaining the temperature of the boundary layer of the water flow within the specified limits is considered.*

Известно, что кавитация (рис. 1) представляет собой явление разрыва жидкости под воздействием растягивающих напряжений, сопровождающееся образованием, развитием и разрушением парогазовых каверн, что является источником интенсивного шумоизлучения, а также причиной эрозии гребных винтов [1]. Известно также, что момент наступления кавитации зависит от объемной прочности жидкости на разрыв  $Z$ , которая в свою очередь является функцией температуры  $T$  [2]

$$Z = P_{\Pi} - 44 \cdot \sqrt{\frac{\sigma^3}{T}}, \quad (1)$$

где  $P_{\Pi}$  — упругость пара жидкости;  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости.

На (рис. 2) представлена экспериментальная зависимость изменения объемной прочности воды от ее температуры. Из представленного графика (рис. 2) следует, что объемная прочность воды имеет максимум при температуре, равной 6°C. Известно, что между потоком жидкости и омываемой ею поверхностью твердого тела происходит конвективный теплообмен, осуществляющийся через тепловой пограничный слой, то есть слой жидкости у стенки тела, в пределах которого температура изменяется от значения, равного температуре стенки, до температуры жидкости вдали от нее [2].



Рис. 1. Кавитация гребного винта.

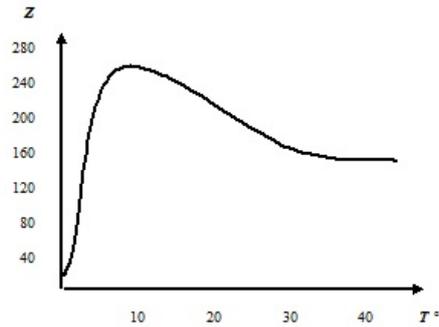


Рис. 2. Зависимость изменения объемной прочности воды от ее температуры.

Рисунок представлен исключительно в редакции авторов.

Таким образом, если поддерживать температуру пограничного слоя обтекающего гребной винт потока воды примерно равной  $6^{\circ}\text{C}$ , то возможно создание условий, неблагоприятных для возникновения кавитации на его лопастях. Рассмотрим возможность поддержания заданной температуры в пограничном слое потока воды, обтекающего реальный гребной винт. Возьмем условный гребной винт радиусом  $r=1$  м с хордой лопасти  $l=0,2$  м, с числом лопастей  $m=6$  и определим величину необходимого теплового потока  $Q$ , излучаемого его поверхностью для обеспечения в пограничном слое заданной температуры равной  $6^{\circ}\text{C}$ . Оценим в сечениях потока на радиусах  $r_1=0,3$  м и  $r_2=0,9$  м в точках с координатами по ширине лопасти  $x_1=0,06$  м и  $x_2=0,18$  м реальные толщины гидродинамического и теплового пограничных слоев, а также коэффициенты теплоотдачи между поверхностью лопасти винта и обтекаемым ее потоком. Оценку указанных величин произведем для скорости вращения гребного винта  $n = 200$  об/мин.

Толщину  $\delta$  гидродинамического пограничного слоя и толщину  $k$  теплового пограничного слоя определим по формулам ламинарного обтекания плоской поверхности [3]

$$\delta = 4,64 \cdot \sqrt{\frac{\nu \cdot x}{\nu}}, \quad (2)$$

где  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воды;  $x$  — координата по ширине лопасти;  $\nu$  — скорость обтекающего потока.

$$k = \frac{4,64 \cdot x}{\sqrt{\frac{\nu \cdot x}{\nu}} \cdot \sqrt[3]{P_r}}, \quad (3)$$

где  $P_r$  — критерий Прандтля, определяемый формулой:

$$P_r = \frac{\mu C_p}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости воды;  $C_p$  — удельная теплоемкость вода;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воды.

Величину коэффициента теплоотдачи найдем из выражения

$$\alpha = \frac{3\lambda}{2k}. \quad (5)$$

Полученные расчетные значения  $\delta$ ,  $k$ ,  $\alpha$  в точках потока  $x_1$  и  $x_2$  представлены в табл. 1.

Значения параметров гидродинамического и теплового пограничных слоёв

|       | $\nu$ ,<br>м/сек | $\delta_{x_1}$ ,<br>м | $\delta_{x_2}$ ,<br>м | $k_{x_1}$ ,<br>м | $k_{x_2}$ ,<br>м | $\alpha_{x_1}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> гр. | $\alpha_{x_2}$ ,<br>вт/м <sup>2</sup> гр. |
|-------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $r_1$ | 6,3              | $5,5 \cdot 10^4$      | $9,6 \cdot 10^4$      | $2,4 \cdot 10^4$ | $4,3 \cdot 10^4$ | $3,5 \cdot 10^3$                          | $1,9 \cdot 10^3$                          |
| $r_2$ | 18,8             | $3,2 \cdot 10^4$      | $5,5 \cdot 10^4$      | $1,4 \cdot 10^4$ | $2,5 \cdot 10^4$ | $6,0 \cdot 10^3$                          | $3,4 \cdot 10^3$                          |

Анализ полученных данных показывает, что толщины гидродинамического и теплового пограничных слоев в одноименных сечениях потока являются величинами одного порядка. Для определения искомого теплового потока, излучаемого поверхностью гребного винта, используем выражение

$$Q = \alpha(t_c - t_o)F, \quad (6)$$

где  $t_o$  — температура невозмущенного потока воды;  $t_c$  — температура излучающей поверхности;  $F$  — площадь поверхности гребного винта.

Величину  $F$  найдем по формуле

$$F = 2rlm. \quad (7)$$

При определении величины теплового потока используем значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , полученное в сечении потока на радиусе  $r_1$  в точке  $x_2$  и соответствующее наихудшему варианту теплообмена. Примем температуру потока невозмущенной жидкости равной  $t_o = 1^\circ\text{C}$  и определим температуру поверхности лопасти гребного винта  $t_c$ , необходимую для поддержания в середине теплового пограничного слоя  $y = 0,5k$  температуры  $6^\circ\text{C}$ . Известно, что распределение температур в тепловом пограничном слое может быть описано уравнением [4]

$$\frac{t - t_c}{t_o - t_c} = 1,5 \frac{y}{k} - 0,5 \left( \frac{y}{k} \right)^3, \quad (8)$$

где  $y$  — расстояние по оси ординат от обтекаемой поверхности.

Тогда, используя зависимости (6) и (8), определим, что для поддержания в середине теплового пограничного слоя лопасти температуры  $\sim 6^\circ\text{C}$  при температуре невозмущенного потока  $t_o = 1^\circ\text{C}$  необходимая температура поверхности лопасти гребного винта должна составлять  $t_c = 1^\circ\text{C}$ , а величина излучаемого теплового потока  $Q = 72,9 \cdot 10^3$  ккал/ч.

Практическая реализация изложенного метода может быть осуществлена посредством принудительной циркуляции через замкнутые каналы в лопастях гребного винта теплоносителя, температура которого может регулироваться с помощью теплообменного аппарата, обеспечивающего требуемую величину теплового потока.

**Вывод.** Исходя из вышеизложенного следует, что путем поддержания в заданных пределах температуры гидродинамического пограничного слоя воды, обтекающего лопасти гребного винта возможно снижение интенсивности кавитационного шума гребных винтов, а также разрушающего воздействия кавитационной эрозии на них.

#### Литература

1. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей». М. 1951.
2. Жуковский В. С. Основы теории теплопередачи. Л.: Госэнергоиздат. 1960.
3. Исаченко В. П. и др. Теплопередача. М.: Изд. Энергия. 1969.

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Пленарные доклады*

|                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИКИ И ГИДРОФИЗИКИ.<br>ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ <i>А. А. Родионов</i> .....                                                                                                                             | 7  |
| ОПЕРАТИВНАЯ ОКЕАНОГРАФИЯ В ЗАДАЧАХ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ<br><i>В. В. Коваленко; А. А. Родионов; Р. Е. Ванкевич</i> .....                                                                                                                          | 11 |
| СОГЛАСОВАННАЯ СО СРЕДОЙ ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНЫХ<br>ЗВУКОВЫХ КАНАЛАХ: СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ, ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ,<br>ПЕРСПЕКТИВЫ <i>А. И. Малеханов; В. В. Коваленко; Д. А. Никитин; А. Г. Сазонтов; В. А. Сергеев</i> ..... | 17 |
| БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ<br>И КИТООБРАЗНЫХ <i>М. П. Иванов; Н. А. Данилов; М. И. Калинов; А. А. Родионов и др.</i> .....                                                                                | 24 |
| АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА И АКУСТООПТИКА В ГИДРОАКУСТИКЕ <i>Л. В. Григорьев</i> .....                                                                                                                                                                     | 31 |
| ИНЖЕНЕРНАЯ МАТЕМАТИКА ДИНАМИКИ, ЭНЕРГЕТИКИ И СТРУКТУРЫ ПРОЦЕССОВ<br>В ОКЕАНЕ <i>Ю. Д. Чашечкин</i> .....                                                                                                                                          | 37 |
| НЕЛОКАЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА. ПОДХОДЫ К ОПИСАНИЮ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ<br>РЕАЛЬНЫХ СРЕД <i>Т. А. Хантулева; А. А. Родионов</i> .....                                                                                                                  | 43 |
| ПРОГРЕСС В ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МОРСКИХ ВОЛН <i>Д. В. Чаликов</i> .....                                                                                                                                                                        | 50 |
| НАВОДНЕНИЯ НЕВЫ КАК КОМПЛЕКСНАЯ НАУЧНАЯ<br>ПРОБЛЕМА <i>Т. И. Малова; А. А. Родионов</i> .....                                                                                                                                                     | 56 |
| ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ<br>ОБСТАНОВКИ НА БАЗЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ<br><i>Я. А. Ивакин; В. И. Ермолаев; А. В. Шатохин</i> .....                                                         | 62 |
| ПАМЯТИ СТАНИСЛАВА АЛЕКСЕЕВИЧА СМИРНОВА – ОРГАНИЗАТОРА<br>ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИКИ<br>И ГИДРОФИЗИКИ» <i>В. А. Попов; И. А. Селезнев</i> .....                                                                | 70 |
| В. И. КЛЯЧКИН — ОСНОВОПОЛОЖНИК НАУЧНОЙ ШКОЛЫ В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНОЙ<br>ГИДРОАКУСТИКИ <i>И. А. Селезнев</i> .....                                                                                                                                    | 74 |

### *Гидроакустические системы*

|                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| АНАЛИЗ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖУЩИХСЯ МОРСКИХ<br>ОБЪЕКТОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ<br><i>О. А. Андреев; В. Н. Кравченко; А. Т. Трофимов</i> ..... | 79  |
| МЕТОД ТРАЕКТОРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ<br>ДВИЖУЩИХСЯ ИСТОЧНИКОВ <i>Г. И. Лосев</i> .....                                                                | 83  |
| ВЫБОР СТРОБОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИСТАНЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ПАССИВНОЙ<br>СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ТРАЕКТОРНОГО АНАЛИЗА <i>О. О. Обуховская; А. А. Янпольская</i> .....                   | 87  |
| ПРИМЕНЕНИЕ ГЛУБОКИХ НЕЙРОСЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ<br>ОБЪЕКТОВ, ОБНАРУЖИВАЕМЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМ СРЕДСТВОМ<br><i>С. Н. Потапычев; А. В. Суслин</i> .....        | 92  |
| ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ КЛАССИФИКАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ<br>ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВЫХОДЕ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ<br><i>Г. С. Малышкин</i> .....                      | 96  |
| АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КАДРОВ ОТОБРАЖЕНИЯ<br>ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НАБЛЮДЕНИЯ <i>А. М. Инюкина; Е. Л. Шейнман</i> .....                        | 101 |
| МЕТОДЫ ПАССИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ДАЛЬНИХ<br>ЗОН АКУСТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЁННОСТИ <i>И. Е. Лободин; А. И. Мамошин</i> .....                              | 105 |

|                                                                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| АЛГОРИТМ ПАССИВНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ <i>А. В. Гриненков; А. И. Машошин</i> .....                                                                                                                                        | 110 |
| ИНВАРИАНТНОСТЬ ОЦЕНКИ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА К УСЛОВИЯМ ПОДВОДНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА<br><i>А. Д. Консон; А. А. Волкова</i> .....                                                                | 114 |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «МАРС-16» НА ПОДВОДНОЙ ЛОДКЕ К-21 ПРИ АТАКЕ НЕМЕЦКОЙ ЭСКАДРЫ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ 5 ИЮЛЯ 1942 г. К 80-ЛЕТИЮ ИСТОРИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ <i>В. А. Попов; В. Б. Железный</i> .....              | 119 |
| СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ БЕЗЭКИПАЖНЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ <i>А. И. Ясников</i> .....                                                                                                           | 125 |
| МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПЕЛЕНГАТОР ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ<br><i>В. З. Кранц; Д. Б. Островский</i> .....                                                                                                                           | 129 |
| ЦИФРОВОЙ ВЕКТОРНО-СКАЛЯРНЫЙ ПРИЁМНИК. ИСПЫТАНИЯ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ <i>А. В. Боев; С. Н. Галий; В. К. Доля; А. П. Ламека</i> и др.....                                                                                       | 133 |
| ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОЛОКАТОРОВ ПРИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ В СОСТАВЕ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ<br><i>А. Ю. Дубровский; А. А. Покровский; В. А. Сергеев</i> .....                                                  | 138 |
| ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТУРЫ СЕТЕВОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ РЕШЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ<br><i>А. И. Машошин; Ю. М. Скородумов</i> .....                                                              | 143 |
| ОРГАНИЗАЦИЯ СТЕНДА ОТЛАДКИ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ<br><i>А. В. Шафранюк</i> .....                                                                                                                              | 147 |
| ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ<br><i>А. В. Шафранюк; Д. А. Добриков</i> .....                                                                                                                      | 151 |
| ДИНАМИЧЕСКОЕ ФОРМИРОВАНИЕ РАСПИСАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ СИГНАЛОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПОИСКА ПОДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННОЙ АКВАТОРИИ<br><i>А. А. Стребкова; Ю. Е. Терехов</i> ..... | 155 |
| РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ В ПЕЛЕНГАТОРАХ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ <i>А. А. Павлов</i> .....                                                           | 159 |
| ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ БОРТОВЫХ АНТЕНН ПОДВОДНЫХ ЛОДОК <i>А. И. Машошин</i> .....                                                                                                                        | 163 |
| ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАСПОЛОЖЕНИЯХ ПРИЁМНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ <i>В. И. Махов</i> .....                                                                                  | 167 |
| СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И МАКЕТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО СТЕРЖНЕВОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В СОСТАВЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ <i>Т. К. Богданов; М. В. Романов; И. И. Стырикович</i> .....                      | 170 |
| ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КАЛИБРОВКИ ВЕКТОРНОГО ПРИЁМНИКА В РЕВЕРБЕРАЦИОННОМ ЗВУКОВОМ ПОЛЕ НЕЗАГЛУШЕННОГО БАССЕЙНА <i>А. Е. Исаев; Г. С. Некрич</i> .....                                                  | 173 |
| ОБ ИЗЛУЧЕНИИ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ С АМПЛИТУДНО-ФАЗОВЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ <i>И. С. Пестерев; Б. Г. Степанов</i> .....                                                                                         | 178 |
| ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИНЧАТОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ<br><i>В. К. Доля; С. Н. Галий; А. А. Панич</i> .....                                                      | 183 |
| АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРИЕМНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ПРОТОТИПОВ <i>А. С. Булычев</i> .....                                                                                            | 187 |

|                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВИАЦИОННОЙ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ САМОЛЕТА ATL2 НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА К ЗАВЯЗКЕ ТРАССЫ ЦЕЛИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ С НОВЫМ ПОКОЛЕНИЕМ РАДИОГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ БУЕВ <i>С. А. Бакуменко; Г. К. Михайлов</i> ..... | 191 |
| МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЛЕНОЧНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ <i>И. И. Дементьев; В. А. Шабанов; Н. С. Шабанова</i> .....                                                                                      | 194 |
| <b>Проблемы прикладной гидрофизики</b>                                                                                                                                                                                                                      |     |
| АКУСТИКА И ГИДРОДИНАМИКА ИМПАКТА КАПЛИ <i>Ю. Д. Чашечкин</i> .....                                                                                                                                                                                          | 200 |
| КОМПОНЕНТЫ ИМПАКТА КАПЛИ: ГЕНЕРАЦИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН И ПУЗЫРЕЙ <i>А. Ю. Ильиных</i> .....                                                                                                                                                                   | 205 |
| ВЛИЯНИЕ СЖИМАЮЩИХ УСИЛИЙ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ НА ГЕНЕРАЦИЮ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН <i>И. В. Стурова; Л. А. Ткачева</i> .....                                                                                                                               | 209 |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В СПЛОШНЫХ СРЕДАХ <i>В. К. Казанков; С. Е. Холодова</i> .....                                                                                                                                                  | 213 |
| ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА БАРОКЛИННЫХ ТЕЧЕНИЙ НА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ ШЕЛЬФЕ о. САХАЛИН (НЕГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ) <i>А. А. Куркин; О. Е. Куркина; Е. А. Рувинская</i> .....                                                                 | 214 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПОТОКА СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ НАД ПОПЕРЕЧНО НЕОДНОРОДНЫМ ДНОМ <i>О. Д. Шишкина</i> .....                                                                                                                                       | 218 |
| ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХОДА ГРЯЗЕВОГО ОПОЛЗНЯ В ВОДНЫЙ БАССЕЙН <i>Ю. Н. Захаров; А. И. Зимин; М. Е. Яшин</i> .....                                                                                                                                        | 222 |
| ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПРИЛИВНОГО (ВОЛНА M2) ДИАПИКНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕГИОНАЛЬНОГО КЛИМАТА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД <i>Е. В. Софьина; Б. А. Касан; А. А. Тимофеев</i> .....                                                            | 226 |
| ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВОЛНОВОГО СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ <i>К. Ю. Булгаков</i> .....                                                                                                                                                                 | 229 |
| СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР И ПРИЧИНЫ ИХ ГЕНЕРАЦИИ ВБЛИЗИ БЕРИНГОВА ПРОЛИВА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ <i>О. А. Атаджанова; А. В. Зимин; С. А. Юдина</i> .....                                                | 232 |
| ОСОБЕННОСТИ СИНОПТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ФРОНТАЛЬНЫХ ЗОН БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ <i>А. А. Коник; А. В. Зимин</i> .....                                                                                                                                         | 236 |
| МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ И КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ <i>Е. И. Свергун; А. В. Зимин</i> .....                                                                                              | 238 |
| О СРЕДНИХ ПОТЕРЯХ НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ДВУМЕРНОМ ВОЛНОВОДЕ СО СЛУЧАЙНЫМ ДНОМ И ШЕРОХОВАТОЙ ПРОНИЦАЕМОЙ ДОННОЙ ГРАНИЦЕЙ <i>О. Э. Гулин; И. О. Ярошук</i> .....                                                                        | 241 |
| ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАВИТАЦИОННЫХ ПОРОГОВ ВО ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА <i>Н. П. Мельников</i> .....                                                                                                                           | 245 |
| ОПТИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ПРИ НАКЛОННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ СРЕДЫ <i>Г. А. Федотов</i> .....                                                                                                         | 250 |
| СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ ОДНОРАЗОВЫХ ОБРЫВНЫХ ЗОНДОВ <i>П. В. Дорохов; В. Н. Логачев; Ф. Б. Овчинников; К. А. Румянцев</i> .....                                                                                | 254 |
| СУДОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ЛИДАР ПЛД-1 И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ ЧЕРНОГО МОРЯ <i>В. А. Глухов; Ю. А. Гольдин; М. А. Родионов</i> .....                                                                                        | 258 |

|                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВОЛНОГРАФ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГИДРОУСЛОВИЙ НА ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ<br><i>Е. В. Волощенко; С. П. Тарасов</i> .....                                                                                               | 262 |
| <b>Методы прикладной гидроакустики</b>                                                                                                                                                                      |     |
| ГРАНИЦЫ ЛУЧЕВОЙ АКУСТИКИ <i>И. Е. Лободин; А. И. Машошин</i> .....                                                                                                                                          | 266 |
| К ВОПРОСУ О КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ МЕТОДАХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ<br>ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНЫХ МНОГОМОДОВЫХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНЫХ<br>ЗВУКОВЫХ КАНАЛАХ <i>А. И. Малеханов; А. В. Смирнов</i> .....                   | 269 |
| СУБОПТИМАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ<br>МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В ПРОСТРАНСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫБОРКИ<br><i>В. С. Мельканович</i> .....                                   | 273 |
| РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КЛИНОВИДНОМ ВОЛНОВОДЕ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ<br>В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ <i>Б. А. Касаткин; С. Б. Касаткин</i> .....                                                                | 277 |
| МОДЕЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ ЗАДАЧ И ИХ ВЕРИФИКАЦИЯ В МЕЛКОМ МОРЕ<br>В ИНФРАЗВУКОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ <i>Б. А. Касаткин; Н. В. Злобина; С. Б. Касаткин</i> .....                                             | 282 |
| ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПОДВОДНОГО ИСТОЧНИКА ШИРОКОПОЛОСНОГО<br>ШУМА НА ОСНОВЕ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННО-СКОРОСТНЫХ ПОРТРЕТОВ<br>В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ <i>Д. А. Никитин; А. А. Родионов</i> .....                   | 287 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЙЯНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ<br>МОДЕЛЕЙ В МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ<br><i>Н. А. Кутузов; А. В. Витальский; Д. А. Костеев; О. А. Потапов</i> и др. ....                                | 291 |
| ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ<br>НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В МЕЛКОМ МОРЕ<br><i>В. Н. Кравченко; Ю. В. Махнев</i> .....                                              | 296 |
| ОЦЕНКА ФАЗОВЫХ СКОРОСТЕЙ НОРМАЛЬНЫХ ВОЛН В МЕЛКОМ МОРЕ ПО ШУМАМ<br>СУДОХОДСТВА С ПОМОЩЬЮ ЛИНЕЙНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ<br><i>Ю. В. Махнев</i> .....                                                | 301 |
| СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СЛУЧАЙНОГО<br>ВОЛНОВОГО ПАКЕТА, ПРИНИМАЕМОГО НА НИЗКОЧАСТОТНУЮ АНТЕННУ<br>В МЕЛКОМ МОРЕ <i>В. Н. Кравченко; Ю. В. Махнев; А. Т. Трофимов</i> ..... | 305 |
| О ВЛИЯНИИ ГЕОМЕТРИИ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МЕЛКОГО МОРЯ<br>НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОДВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ <i>П. Н. Кравчун</i> .....                                                      | 309 |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЛИНЕЙКИ ГИДРОФОНОВ В АДАПТИВНОМ<br>КОМПЕНСАТОРЕ ПОМЕХ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОСТИ<br><i>В. С. Колмогоров; А. В. Прийма; С. А. Шпак</i> .....                                       | 313 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ<br>ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО НЕОДНОРОДНЫМ ТРАССАМ<br><i>А. Р. Агишев; В. Н. Линник; А. А. Скорьнин</i> .....                                | 317 |
| ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ И ДИНАМИЧЕСКОГО ШУМА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ<br>ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В МЕЛКОМ МОРЕ<br><i>В. Г. Бурдуковская; М. А. Раевский</i> .....                                       | 321 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО<br>ОБРАТНОГО РАССЕЙЯНИЯ В СРЕДНЕМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ<br><i>А. В. Ермошкин; И. А. Капустин; Д. А. Костеев; А. А. Мольков</i> и др.....          | 325 |
| АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ДИСТАНЦИИ И ГЛУБИНЫ<br>ИСТОЧНИКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА, ПОЛУЧАЕМЫХ<br>ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫМ МЕТОДОМ <i>П. Д. Колбин; А. С. Корецкая</i> .....       | 329 |
| ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО<br>СИГНАЛА ЛУЧЕВЫМ МЕТОДОМ <i>А. С. Корецкая; Н. С. Дмитриев</i> .....                                                                     | 333 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОТЕРЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В АВАЧИНСКОМ ЗАЛИВЕ<br><i>П. Н. Волгин; Н. Г. Ковалевский; В. В. Мальй</i> .....                                                                               | 337 |
| ВТОРИЧНОЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ <i>А. В. Клячкин</i> ..                                                                                                                                                                                             | 343 |
| АКТУАЛЬНОСТЬ СОЗДАНИЯ ЭТАЛОНА ДЛЯ ФАЗОВОЙ КАЛИБРОВКИ ГИДРОФОНОВ<br><i>Б. И. Хатамтаев</i> .....                                                                                                                                                                               | 347 |
| АЛГОРИТМ ВЫРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ОТ НЕЖЕСТКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ПРИ НАЛИЧИИ ИСКАЖЕНИЙ ЕЕ ФОРМЫ ВСЛЕДСТВИЕ ТЕЧЕНИЙ <i>С. И. Рудницкий; В. Ю. Ткачук</i> .....                                                                            | 351 |
| ОПТИМАЛЬНОЕ СОЧЕТАНИЕ ПОРОГОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПО УРОВНЮ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ В ПАССИВНОМ АКУСТИЧЕСКОМ ОБНАРУЖИТЕЛЕ <i>Р. И. Горбачев; С. Б. Егоров</i> .....                                                                                                                            | 355 |
| КРАТКИЙ ПЕРЕЧЕНЬ ФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ, НАБЛЮДАВШИХСЯ В ОБЛАСТИ ГИДРОАКУСТИКИ <i>В. Б. Железный</i> .....                                                                                                                                                                       | 359 |
| ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РЫБ В САДКАХ РЫБОВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ<br><i>М. Ю. Кузнецов; И. А. Убарчук; В. И. Поляничко</i> .....                                                                                                                                               | 363 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПУЧКА <i>С. И. Кузнецов</i> .....                                                                                                                                            | 368 |
| <b><i>Инженерное обеспечение гидрофизики и гидроакустики</i></b>                                                                                                                                                                                                              |     |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНФОРМАЦИОНО-СОПРОВОДИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ДАННЫХ <i>А. Б. Химаныч</i> .....                                                                                                                    | 371 |
| АВТОНОМНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БИОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ<br><i>Н. А. Данилов; М. П. Иванов</i> .....                                                                                                                | 375 |
| О КОРРЕКЦИИ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЕМНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТОРОНЕ<br><i>Т. К. Богданов; Е. А. Ульянов</i> .....                                                                                                       | 379 |
| СПОСОБ МИНИМИЗАЦИИ ДЛИН КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ДАТЧИКОВ ИЗ СОСТАВА МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО НАБЛЮДЕНИЯ К ИСТОЧНИКАМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ, РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ПО ПЛОЩАДИ АКВАТОРИИ<br><i>В. Н. Митин; Ю. Е. Терехов</i> .....                                        | 383 |
| ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ КЛЮЧЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ <i>С. А. Калашиников</i> .....                                                                                                                                                                | 387 |
| ВЛИЯНИЕ ФАКТОРА ОБРЫВА ТОКА ДРОССЕЛЯ ФИЛЬТРА НА АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛЮЧЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ<br><i>Р. С. Григорьев; С. А. Калашиников; Д. И. Шустимов</i> .....                                                                                            | 392 |
| ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ РАЗНОТИПНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ В СОСТАВЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ<br><i>В. А. Александров; Ю. В. Казаков; Л. В. Маркова</i> .....                                                                                                           | 397 |
| ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ И РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В КЛЮЧЕВЫХ УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ<br><i>В. А. Александров; Ю. В. Казаков; Л. В. Маркова; Г. С. Симонова</i> .....                                      | 402 |
| ВЫСОКОТОЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДЕ <i>Ю. А. Ломовацкий</i> .....                                                                                                                                                                                                   | 406 |
| АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ IN SITU СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В МОРСКОЙ ВОДЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ЗОНДОМ ТИПА «ОЛД-1» И ИЗМЕРИТЕЛЕМ СКОРОСТИ ЗВУКА MINISVP ФИРМЫ VALERPORT<br><i>А. Ф. Мирончук; К. А. Румянцев; А. С. Светличный</i> ..... | 410 |

|                                                                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| РАЗРАБОТКА АТЛАСА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА<br>ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА <i>К. П. Львов; М. А. Науменко</i> .....                                                                                       | 414 |
| МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНЫХ КАНАЛОВ<br>МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК В УСЛОВИЯХ БАССЕЙНА<br><i>А. К. Батанов; А. А. Кузьмин; И. С. Пестерев</i> .....                                       | 418 |
| СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ В ГИДРОСФЕРЕ НА БАЗЕ<br>ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ<br><i>Э. В. Кречетова; В. Л. Мартынов; М. С. Шиманская</i> .....                                                     | 421 |
| МЕТОД ОЦЕНКИ ЗАГЛУБЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО БУЯ<br>ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОРСКИХ ТЕЧЕНИЙ <i>Б. И. Исрафилов; М. А. Дубатков</i> .....                                                              | 425 |
| РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ СВЯЗИ<br><i>А. М. Грузликов; А. В. Кулаков; Е. В. Лукоянов; Д. А. Мухин</i> .....                                                                            | 429 |
| ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ<br>ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ<br><i>Е. З. Коварская; А. В. Краснос; К. Г. Погудин; И. Б. Московенко и др.</i> .....                             | 433 |
| ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ СТЕРЖНЕВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ<br>С ПОНИЖЕННОЙ ВИБРОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ <i>И. И. Стырикович</i> .....                                                                        | 437 |
| ЦИФРОВЫЕ И АНАЛОГОВЫЕ ПРИЕМНИКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ ОБЪЕМНОЙ<br>РЕВЕРБЕРАЦИИ <i>Е. Е. Леоненко; К. А. Румянцев; Т. В. Храброва</i> .....                                                                   | 440 |
| ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ<br>НА ПАРАМЕТРЫ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА<br>ЖИДКОСТЬ–ТВЁРДОЕ ТЕЛО <i>Ф. Ф. Лезуша; К. Н. Пялов; Г. В. Чижов</i> ..... | 444 |
| ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ В СРЕДЕ С ПОТЕРЯМИ,<br>НАХОДЯЩЕЙСЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ С ТЕПЛОПРОВОДНЫМИ СТЕНКАМИ<br><i>Ф. Ф. Лезуша; Г. В. Чижов; К. Н. Пялов</i> .....                  | 448 |
| МОДЕЛЬ СХЕМЫ ДАННЫХ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ<br>ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ВООРУЖЕНИЯ <i>А. В. Шатохин; Я. А. Ивакин; И. А. Красников</i> .....                                                  | 452 |
| ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ДИВЕРСИФИКАЦИИ ВОЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО<br>ПОТЕНЦИАЛА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ<br><i>А. В. Шатохин; И. А. Селезнев; Я. А. Ивакин</i> .....                                     | 458 |
| МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ В СЛОЖНОЙ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКЕ<br><i>Е. М. Грамузов; Н. В. Калинина; А. А. Куркин</i> .....                                                                                  | 462 |
| СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕНСИМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКОГО<br>ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ <i>Д. Л. Винокуров</i> .....                                                                                                     | 467 |
| ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ НАМАГНИЧИВАЕМЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ<br><i>Б. М. Кондратенко; А. В. Стрижов</i> .....                                                                                                            | 472 |
| О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ<br>ГРЕБНЫХ ВИНТОВ <i>В. П. Щеголихин</i> .....                                                                                                | 477 |

# CONTENT

## *Plenary reports*

|                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| APPLIED TECHNOLOGIES IN HYDROACOUSTICS AND HYDROPHYSICS.<br>PROBLEMS AND RESEARCH DIRECTIONS <i>A. A. Rodionov</i> .....                                                                                                                            | 7  |
| OPERATIONAL OCEANOGRAPHY IN UNDERWATER SURVEILLANCE TASKS<br><i>V. V. Kovalenko; A. A. Rodionov; R. E. Vankevitch</i> .....                                                                                                                         | 11 |
| MATCHED FIELD ACOUSTIC SIGNAL PROCESSING IN UNDERWATER SOUND CHANNELS:<br>STATE-OF-THE-ART, ESTIMATES OF THE OUTPUT PERFORMANCES, AND THE PROSPECTS<br><i>A. I. Malekhanov; V. V. Kovalenko; D. A. Nikitin; A. G. Sazontov; V. A. Sergeev</i> ..... | 17 |
| BIOTECHNICAL SYSTEMS BASED ON THE USE OF TECHNICAL FACILITIES AND CETACEANS<br><i>M. P. Ivanov; N. A. Danilov; M. I. Kalinov; A. A. Rodionov et al.</i> .....                                                                                       | 24 |
| ACOUSTOELECTRONICS AND ACOUSTOOPTICS IN HYDROACOUSTICS <i>L. V. Grigoryev</i> .....                                                                                                                                                                 | 31 |
| ENGINEERING MATHEMATICS OF DYNAMICS, ENERGETICS AND STRUCTURE<br>OF PROCESSES IN THE OCEAN <i>Yu. D. Chashechkin</i> .....                                                                                                                          | 37 |
| NONLOCAL HYDRODYNAMICS. APPROCHES TO DESCRIBE TURBULENT FLOWS<br>OF REAL MEDIA <i>T. A. Khantuleva; A. A. Rodionov</i> .....                                                                                                                        | 43 |
| ADVANCE IN NUMERICAL SIMULATION OF SEA WAVES <i>D. V. Chalikov</i> .....                                                                                                                                                                            | 50 |
| NEVA FLOODS AS A COMPLEX SCIENTIFIC PROBLEM <i>T. I. Malova; A. A. Rodionov</i> .....                                                                                                                                                               | 56 |
| SUPPORT OF DECISION-MAKING ON CREATION OF UNDERWATER SURVEILLANCE SYSTEMS<br>BASED ON COMPUTER SIMULATION METHODS <i>Ya. A. Ivakin; V. I. Ermolaev; A. V. Shatokhin</i> .....                                                                       | 62 |
| IN MEMORY OF STANISLAV ALEKSEEVICH SMIRNOV – ORGANIZER OF ALL-RUSSIAN<br>CONFERENCE «ADVANCED TECHNOLOGIES OF HYDROACOUSTICS AND HYDROPHYSICS»<br><i>V. A. Popov; I. A. Seleznev</i> .....                                                          | 70 |
| V. I. KLYACHKIN — A FOUNDER OF SCIENTIFIC SCHOOL OF APPLIED HYDROACOUSTICS<br><i>I. A. Seleznev</i> .....                                                                                                                                           | 74 |

## *Hydroacoustic systems*

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ANALYSIS OF THE WORK OF ALGORITHMS FOR DETECTING TRAJECTORIES OF MOVING<br>MARINE OBJECTS BY HYDROACOUSTIC SURVEILLANCE SYSTEMS<br><i>O. A. Andreev; V. N. Kravchenko; A. T. Trofimov</i> ..... | 79  |
| METHOD OF TRAJECTORY-SPATIAL FILTERING OF NOISE EMISSION FROM MOVING<br>SOURCES <i>G. I. Losev</i> .....                                                                                        | 83  |
| THE CHOICE OF STROBES FOR THE DISTANCE ASSESSMENT BY HYDROACOUSTICS<br>PASSIVE SYSTEM ON THE BASIS OF THE TRAJECTORY ANALYSIS<br><i>O. O. Obukhovskaya; A. A. Yanpolskaya</i> .....             | 87  |
| APPLICATION OF DEEP NEURAL NETWORKS FOR SOLVING PROBLEMS OF CLASSIFICATION<br>OF OBJECTS DETECTED BY SONAR MEAN <i>S. N. Potapychev; A. V. Suslin</i> .....                                     | 92  |
| ON A METHOD FOR CLASSIFYING HYDROACOUSTIC RADIATION SOURCES<br>AT THE OUTPUT OF ADAPTIVE SPATIAL PROCESSING <i>G. S. Malyshkin</i> .....                                                        | 96  |
| ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF AUTOMATING THE DESIGN OF DISPLAYING FRAMES<br>OF SONAR SURVEILLANCE EQUIPMENT <i>A. M. Injukina; E. L. Sheinman</i> .....                                        | 101 |
| METHODS OF PASSIVE DETERMINATION OF COORDINATES OF OBJECTS IN DISTANT<br>ZONES OF ACOUSTIC ILLUMINATION <i>I. E. Lobodin; A. I. Mashoshin</i> .....                                             | 105 |
| THE ALGORITHM OF PASSIVE DETERMINATION OF COORDINATES<br><i>A. V. Grinenkov; A. I. Mashoshin</i> .....                                                                                          | 110 |

|                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| INVARIANCE OF BROADBAND SIGNAL SOURCE DIPPING DEPTH ESTIMATION UNDER CONDITIONS OF UNDERWATER ACOUSTIC CHANNEL <i>A. D. Konson; A. A. Volkova</i> .....                                                                                            | 114 |
| USING A HYDROACOUSTIC STATION «MARS-16» ON SUBMARINE K-21 WHEN ATTACKING GERMAN SQUADRON IN NORWEGIAN SEA ON THE 5th OF JULY 1942. TO THE 80th ANNIVERSARY OF THE HISTORICAL EVENT <i>V. A. Popov; V. B. Zhelezny</i> .....                        | 119 |
| CURRENT AND FUTURE TECHNOLOGY OF FOREIGN UNMANNED SURFACE VEHICLES <i>A. I. Iasnikov</i> .....                                                                                                                                                     | 125 |
| SMALL-SIZE DIRECTION FINDER OF HYDROACOUSTIC SIGNALS <i>V. Z. Krants; D. B. Ostrovskiy</i> .....                                                                                                                                                   | 129 |
| DIGITAL VECTOR-SCALAR RECEIVER. FIELD TESTS <i>A. V. Boev; S. N. Galiy; V. K. Dolya; A. P. Lameka et al.</i> .....                                                                                                                                 | 133 |
| APPROACH TO THE VALIDATION OF THE PARAMETERS OF SONAR SYSTEMS WHILE OPERATING AS A PART OF A MULTIPLE SYSTEM <i>A. Yu. Dubrovsky; A. A. Pokrovsky; V. A. Sergeev</i> ...                                                                           | 138 |
| VALIDATION OF THE NETWORK HYDROACOUSTIC COMMUNICATION EQUIPMENT CHARACTERISTICS PROVIDING THE SOLUTION OF PRACTICAL PROBLEMS <i>A. I. Mashoshin; Yu. M. Skorodumov</i> .....                                                                       | 143 |
| ORGANIZATION OF THE STAND FOR DEBUGGING UNDERWATER ENVIRONMENT SURVEILLANCE SYSTEMS <i>A. V. Shafranyuk</i> .....                                                                                                                                  | 147 |
| SIMULATION MODEL OF THE ICE ENVIRONMENT SURVEILLANCE SYSTEM <i>A. V. Shafranyuk; D. A. Dobrikov</i> .....                                                                                                                                          | 151 |
| DYNAMIC SCHEDULING OF SONAR SIGNALS IN A MULTISTATIC UNDERWATER MONITORING SYSTEM FOR THE PROBLEM OF UNDERWATER OBJECTS SEARCH IN A CONFINED WATER AREA <i>A. A. Strebkova; Yu. E. Terekhov</i> .....                                              | 155 |
| THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES ON THE APPLICATION OF COMPLEX SIGNALS IN DIRECTION FINDERS OF AUTONOMOUS UNDERWATER ENVIRONMENT SURVEILLANCE SYSTEMS <i>A. A. Pavlov</i> .....                                                                 | 159 |
| VALIDATION OF CHARACTERISTICS OF ONBOARD WIDE-APERTURE ANTENNAS OF FUTURE-TECHNOLOGY SUBMARINES <i>A. I. Mashoshin</i> .....                                                                                                                       | 163 |
| DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF THE UNDERWATER VEHICLE ANTENNA AT DIFFERENT LOCATIONS OF RECEIVING AND EMITTING ELEMENTS <i>V. I. Makhov</i> .....                                                                                                  | 167 |
| COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF MODELING AND PROTOTYPING OF A BROADBAND ROD PIEZOELECTRIC TRANSDUCER AS PART OF AN ANTENNA ARRAY <i>T. K. Bogdanov; M. V. Romanov; I. I. Styrikovich</i> .....                                              | 170 |
| EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THE POSSIBILITY OF A VECTOR RECEIVER CALIBRATION IN THE REVERBERATION SOUND FIELD OF A NONANECHOIC WATER TANK <i>A. E. Isaev; G. S. Nekrich</i> .....                                                                 | 173 |
| ON THE RADIATION OF SHORT PULSES BY PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS WITH AMPLITUDE-PHASE EXCITATION <i>I. S. Pesterev; B. G. Stepanov</i> .....                                                                                                          | 178 |
| OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF A PLATE PIEZOELECTRIC TRANSDUCER OF A MULTIPLE HYDROACOUSTIC ANTENNA <i>V. K. Dolya; S. N. Galiy; A. A. Panich</i> .....                                                                                             | 183 |
| ALGORITHM OF AUTOMATION OF DESIGNING OF HYDROACOUSTIC RECEIVING ANTENNAS BY MEANS OF DIGITAL PROTOTYPES <i>A. S. Bulychev</i> .....                                                                                                                | 187 |
| ESTIMATION THE EFFECTIVENESS OF THE SONOBUOY SYSTEM FOR THE ATL2 AIRCRAFT BASED ON A PROBABILISTIC APPROACH TO TRACK-INITIATION OF THE TARGET IN DIFFERENT MODES USING A NEW GENERATION OF SONOBUOYS <i>S. A. Bakumenko; G. K. Mikhailov</i> ..... | 191 |
| METHOD OF CALCULATION OF SENSITIVITY OF FILM PIEZOELECTRIC TRANSDUCER OF THE SONAR ANTENNA <i>I. I. Dementiev; V. A. Shabanov; N. S. Shabanova</i> .....                                                                                           | 194 |

**Problems of applied hydrophysics**

|                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ACOUSTICS AND HYDRODYNAMICS OF THE DROP IMPACT <i>Yu. D. Chashechkin</i> .....                                                                                                                                                                      | 200 |
| DROP IMPACT COMPONENTS: GENERATION OF CAPILLARY WAVES<br>AND BUBBLES <i>A. Yu. Ilinykh</i> .....                                                                                                                                                    | 205 |
| INFLUENCE OF COMPRESSIVE FORCES IN THE ICE COVER ON THE GENERATION<br>OF FLEXURAL-GRAVITY WAVES <i>I. V. Sturova; L. A. Tkacheva</i> .....                                                                                                          | 209 |
| SIMULATION OF EXTREME WAVE PHENOMENA IN CONTINUOUS MEDIA<br><i>V. K. Kazankov; S. E. Kholodova</i> .....                                                                                                                                            | 213 |
| SPATIAL STRUCTURE OF BAROCLINIC CURRENTS ON THE NORTH-EASTERN SHELF<br>OF SAKHALIN ISLAND (NON-HYDROSTATIC NUMERICAL SIMULATION)<br><i>A. A. Kurkin; O. E. Kurkina; E. A. Rouvinskaya</i> .....                                                     | 214 |
| INVESTIGATION OF KINEMATICS OF FLOW OF STRATIFIED FLUID OVER TRANSVERSELY<br>INHOMOGENEOUS BOTTOM <i>O. D. Shishkina</i> .....                                                                                                                      | 218 |
| NUMERICAL SIMULATION OF MUD LANDSLIDE DESCENT INTO A WATER BASIN<br><i>Y. N. Zakharov; A. I. Zimin; M. E. Yashin</i> .....                                                                                                                          | 222 |
| PARAMETRIZATION OF TIDAL (M2 WAVE) DIAPYCNAL MIXING IN REGIONAL CLIMATE<br>SIMULATION OF THE LAPTEV SEA IN SUMMER PERIOD<br><i>E. V. Sofina; B. A. Kagan; A. A. Timofeev</i> .....                                                                  | 226 |
| SIMULATING OF THE STRATIFIED WAVE BOUNDARY LAYER <i>K. Yu. Bulgakov</i> .....                                                                                                                                                                       | 229 |
| STATISTICAL ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF SURFACE MANIFESTATIONS<br>OF EDDY STRUCTURES AND THE REASONS FOR THEIR GENERATION NEAR<br>THE BERING STRAIT ACCORDING TO SATELLITE DATA<br><i>O. A. Atadzhanova; A. V. Zimin; S. A. Yudina</i> ..... | 232 |
| FEATURES OF THE SYNAPTIC DYNAMICS OF THE FRONTAL ZONES OF THE BARENTS<br>AND KARA SEAS <i>A. A. Konik; A. V. Zimin</i> .....                                                                                                                        | 236 |
| MESOSCALE EDDIES AND SHORT-PERIOD INTERNAL WAVES OF THE KURIL-KAMCHATKA<br>REGION FROM SATELLITE DATA <i>E. I. Svergun; A. V. Zimin</i> .....                                                                                                       | 238 |
| ON AVERAGE LOSSES OF LOW-FREQUENCY SOUND DURING PROPAGATION<br>IN A TWO-DIMENSIONAL WAVEGUIDE WITH RANDOM BOTTOM AND ROUGH<br>PENETRABLE BOTTOM BOUNDARY <i>O. E. Gulin; I. O. Yaroshchuk</i> .....                                                 | 241 |
| TEMPORARY VARIABILITY OF CAVITATION THRESHOLDS IN THE FRONTAL ZONE<br>OF THE NORTHWESTERN PACIFIC OCEAN <i>N. P. Melnikov</i> .....                                                                                                                 | 245 |
| OPTIMAL CONFIGURATION OF PRESSURE SENSORS IN AN INCLINED ORIENTATION<br>OF A HYDROSTATIC MARINE DENSITY METER <i>G. A. Fedotov</i> .....                                                                                                            | 250 |
| SYSTEM FOR MEASURING HYDROLOGICAL PARAMETERS USING DISPOSABLE<br>BREAKAWAY PROBES <i>P. V. Dorokhov; V. N. Logachev; F. B. Ovchinnikov; K. A. Rumyansev</i> .....                                                                                   | 254 |
| SHIPBOARD POLARIZED LIDAR PLD-1 AND SOME RESULTS OF ITS APPLICATION<br>IN COASTAL AREAS OF THE BLACK SEA <i>V. A. Glukhov; Yu. A. Goldin; M. A. Rodionov</i> .....                                                                                  | 258 |
| THE WAVEGRAPH FOR MONITORING OF HYDROACOUSTIC CONDITIONS IN OFFSHORE<br>WATER AREA <i>E. V. Voloshchenko; S. P. Tarasov</i> .....                                                                                                                   | 262 |

**Methods of applied hydroacoustics**

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FREQUENCY BOUNDARIES OF RAY ACOUSTICS <i>I. E. Lobodin; A. I. Mashoshin</i> .....                                                                | 266 |
| ON THE SUBOPTIMAL TECHNIQUES OF COHERENCE-REDUCED SIGNAL PROCESSING<br>IN UNDERWATER SOUND CHANNELS <i>A. I. Malekhanov; A. V. Smirnov</i> ..... | 269 |

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SUBOPTIMAL IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING ALGORITHMS FOR MULTI-ELEMENT ANTENNA ARRAYS IN THE SPACE OF SAMPLING ELEMENTS<br><i>V. S. Melkanovich</i> .....                                 | 273 |
| RESONANCE CONDITIONS IN WEDGE-SHAPED WAVEGUIDE AND ITS VERIFICATION IN SUBSONIC FREQUENCY RANGE<br><i>B. A. Kasatkin; S. B. Kasatkin</i> .....                                                          | 277 |
| MODEL SOLUTIONS OF THE BOUNDARY VALUE PROBLEMS AND ITS VERIFICATION IN SHALLOW SEA IN THE SUBSONIC FREQUENCY RANGE<br><i>B. A. Kasatkin; N. V. Zlobina; S. B. Kasatkin</i> .....                        | 282 |
| LOCALIZATION OF A MOVING UNDERWATER BROADBAND NOISE SOURCE BASED ON ITS SPATIAL-VELOCITY PORTRAITS IN THE FREQUENCY DOMAIN<br><i>D. A. Nikitin; A. A. Rodionov</i> .....                                | 287 |
| DETERMINATION OF SCATTERING CHARACTERISTICS OF LARGE-SCALE MODELS IN SHALLOW WATERS<br><i>N. A. Kutuzov; A. V. Vital'sky; D. A. Kosteev; O. A. Potapov et al.</i> .....                                 | 291 |
| ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF SEVERAL ALGORITHMS FOR DETECTING OF LOW-FREQUENCY HYDROACOUSTIC SIGNALS IN SHALLOW SEA<br><i>V. N. Kravchenko; Y. V. Makhnev</i> .....                                  | 296 |
| ESTIMATION OF THE PHASE VELOCITIES OF NORMAL WAVES IN A SHALLOW SEA FROM THE NOISE OF SHIPPING USING A LINEAR PHASED ARRAY ANTENNA<br><i>Y. V. Makhnev</i> .....                                        | 301 |
| SYNTHESIS OF OPTIMAL ALGORITHM FOR SPATIAL PROCESSING OF A RANDOM WAVE PACKET RECEIVED ON A LOW-FREQUENCY ANTENNA IN A SHALLOW SEA<br><i>V. N. Kravchenko; Y. V. Makhnev; A. T. Trofimov</i> .....      | 305 |
| EFFECT OF GEOMETRY OF THE ACOUSTIC MONITORING SYSTEM ON THE SOLUTION STABILITY IN PRESENCE OF UNDERWATER CURRENTS<br><i>P. N. Kravchun</i> .....                                                        | 309 |
| USING A VERTICAL LINE OF HYDROPHONES IN ADAPTIVE NOISE COMPENSATOR UNDER MULTIPATH CONDITIONS<br><i>V. S. Kolmogorov; A. V. Priima; S. A. Shpak</i> .....                                               | 313 |
| DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS FOR HYDROACOUSTIC SIGNALS DISTRIBUTION CALCULATIONS IN RANGE-DEPENDENT ENVIRONMENTS<br><i>A. R. Agishev; V. N. Linnik; A. A. Skorynin</i> .....                     | 317 |
| INFLUENCE OF WIND WAVES AND DYNAMIC NOISE ON CHARACTERISTICS OF HORIZONTAL ARRAY IN THE SHALLOW SEA<br><i>V. G. Burdukovskaya; M. A. Raevsky</i> .....                                                  | 321 |
| ESTIMATION OF SURFACE WAVE CONDITION BASED ON LONG-RANGE ACOUSTIC BACKSCATTERING IN A KILOHERTZ RANGE<br><i>A. V. Ermoshkin; I. A. Kapustin; D. A. Kosteev; A. A. Molkov et al.</i> .....               | 325 |
| ALGORITHM FOR PROCESSING OF HYDROACOUSTIC SIGNAL SOURCE RANGE AND DEPTH ESTIMATION RESULTS OBTAINED BY THE SPACE-TIME-FREQUENCY METHOD<br><i>P. D. Kolbin; A. S. Koretskaya</i> .....                   | 329 |
| IMPROVING THE ACCURACY OF HYDROACOUSTIC SIGNAL SOURCE COORDINATES ESTIMATION BY THE RAY METHOD<br><i>A. S. Koretskaya; N. S. Dmitriev</i> .....                                                         | 333 |
| ANALYSIS OF THE RESULTS OF HYDROACOUSTIC CALCULATIONS IN DETERMINING THE LOSS OF HYDROACOUSTIC ENERGY PROPAGATION IN THE AVACHA BAY<br><i>P. N. Volgin; N. G. Kovalevskij; V. V. Malyj</i> .....        | 337 |
| SECONDARY HYDROACOUSTIC FIELD OF MULTILAYERED STRUCTURES<br><i>A. V. Klyachkin</i> .....                                                                                                                | 343 |
| THE RELEVANCE OF CREATING A STANDARD FOR PHASE CALIBRATION OF HYDROPHONES<br><i>B. I. Khatamtaev</i> .....                                                                                              | 347 |
| ALGORITHM OF PARAMETERIZATION OF SPATIAL PROCESSING OF SIGNALS RECEIVED FROM NONRIGID CYLINDRICAL ARRAY IN PRESENCE OF ITS SHAPE DEFECTS DUE TO CURRENTS<br><i>C. I. Rudnitsky; V. Y. Tkachuk</i> ..... | 351 |
| OPTIMAL COMBINATION OF LEVEL AND TIME DETECTION THRESHOLDS IN A PASSIVE ACOUSTIC DETECTOR<br><i>R. I. Gorbachev; S. B. Egorov</i> .....                                                                 | 355 |

|                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| BRIEF LIST OF PHYSICAL ANOMALIES OBSERVED IN HYDROACOUSTICS <i>V. B. Zheleznyi</i> .....                                                                                                                 | 359 |
| HYDROACOUSTIC MONITORING OF FISH IN FISH FARMING CAGES                                                                                                                                                   |     |
| <i>M. Y. Kuznetsov; I. A. Ubarchuk; V. I. Polyanchko</i> .....                                                                                                                                           | 363 |
| INVESTIGATION OF THE ACOUSTIC FLOWS INFLUENCE ON THE RESULT OF MEASURING<br>THE TOTAL POWER OF AN ULTRASONIC BEAM <i>S. I. Kuznetsov</i> .....                                                           |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 368 |
| <b><i>Engineering support of hydrophysics and hydroacoustics</i></b>                                                                                                                                     |     |
| DETERMINATION OF THE RESIDUAL RESOURCE OF RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS USING<br>CAPABILITIES OF THE INFORMATION AND ACCOMPANYING DATA NETWORK                                                                |     |
| <i>A. B. Khimanych</i> .....                                                                                                                                                                             | 371 |
| AUTONOMOUS BROADBAND MULTICHANNEL DIGITALLY CONTROLLED AMPLIFIER<br>FOR RECORDING BIOACOUSTIC SIGNALS <i>N. A. Danilov; M. P. Ivanov</i> .....                                                           |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 375 |
| ON THE CORRECTION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF RECEIVING-RADIATING<br>TRANSDUCERS OF HYDROACOUSTIC ANTENNAS ON THE ELECTRICAL SIDE                                                                    |     |
| <i>T. K. Bogdanov; E. A. Ulyanov</i> .....                                                                                                                                                               | 379 |
| CABLE LINES LENGTH MINIMIZATION METHOD FOR CONNECTING SENSORS<br>OF A MULTISTATIC UNDERWATER MONITORING SYSTEM WITH POWER SOURCES,<br>DISTRIBUTED OVER AN AREA <i>V. N. Mitin; Yu. E. Terekhov</i> ..... |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 383 |
| ASSESSMENT OF WORK STABILITY OF SWITCH REGULATORS WITH NEGATIVE FEEDBACK                                                                                                                                 |     |
| <i>S. A. Kalashnikov</i> .....                                                                                                                                                                           | 387 |
| INFLUENCE OF THE FACTOR CURRENT BREAK OF FILTER CHOKE ON AMPLITUDE<br>RESPONSES OF SWITCH CONVERTERS <i>R. S. Grigorev; S. A. Kalashnikov; D. I. Shustimov</i> .....                                     |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 392 |
| FEATURES OF THE OPERATION OF VARIOUS TYPES OF POWER AMPLIFIERS AS PART<br>OF HYDROACOUSTIC TRANSMITTING DEVICES <i>V. A. Alexandrov; Yu. V. Kazakov; L. V. Markova</i> .....                             |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 397 |
| BASIC PRINCIPLES OF IMPLEMENTATION AND CALCULATION OF STATIC LOSSES<br>IN KEY POWER AMPLIFIERS, TAKING INTO ACCOUNT THE HIGH-FREQUENCY<br>COMPONENTS OF THE LOSS-PASS FILTER CURRENT                     |     |
| <i>V. A. Alexandrov; Yu. V. Kazakov; L. V. Markova; G. S. Simonova</i> .....                                                                                                                             | 402 |
| HIGH-PRECISION SOUND VELOCITY PROFILERS <i>Y. A. Lomovackiy</i> .....                                                                                                                                    |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 406 |
| ANALYSIS RESULTS OF DIRECT AND INDIRECT IN SITU MEASUREMENTS OF SOUND<br>SPEED IN SEAWATER DONE WITH HYDROLOGICAL PROBE OF TYPE «OLD-1»<br>AND SOUND VELOCITY PROFILER MINISVP BY VALEPORT               |     |
| <i>A. F. Mironchuk; K. A. Rumyansev; A. S. Svetlichny</i> .....                                                                                                                                          | 410 |
| DEVELOPMENT OF ATLAS OF VERTICAL DISTRIBUTION OF SOUND VELOCITY<br>OF LAKE LADOGA <i>K. P. Lvov; M. A. Naumenko</i> .....                                                                                |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 414 |
| METHOD OF MEASURING THE SENSITIVITY OF RECEIVING CHANNELS OF MULTI-ELEMENT<br>ANTENNA ARRAYS UNDER BASIN CONDITIONS <i>A. K. Batanov; A. A. Kuzmin; I. S. Pesterev</i> .....                             |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 418 |
| IMPROVEMENT OF TELECOMMUNICATIONS IN THE HYDROSPHERE BASED<br>ON FIBER-OPTIC TECHNOLOGIES <i>E. V. Krechetova; V. L. Martynov; M. S. Shimanskaya</i> .....                                               |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 421 |
| METHOD OF DEPTH EVALUATION OF A POSITIONAL HYDROMETEOROLOGICAL BUOY<br>UNDER INFLUENCE OF SEA FLOWS <i>B. I. Israfilov; M. A. Dubatkov</i> .....                                                         |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 425 |
| DEVELOPMENT RESULTS OF THE UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION SYSTEM                                                                                                                                      |     |
| <i>A. M. Gruzlikov; A. V. Kulakov; E. V. Lukoyanov; D. A. Mukhin</i> .....                                                                                                                               | 429 |
| DETERMINATION OF PHYSICAL-MECHANICAL AND ELECTROPHYSICAL PARAMETERS<br>OF PIEZOCERAMIC ELEMENTS                                                                                                          |     |
| <i>E. Z. Kovarskaya; A. V. Krasnov; K. G. Pogudin; I. B. Moskovenko et al.</i> .....                                                                                                                     | 433 |
| ON A MODEL OF THE BAR UNDERWATER PIEZOCERAMIC TRANSDUCER WITH REDUCED<br>VIBRATION SENSITIVITY <i>I. I. Styrikovich</i> .....                                                                            |     |
|                                                                                                                                                                                                          | 437 |

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| DIGITAL AND ANALOG RECEIVERS FOR VOLUMETRIC REVERBERATION SIGNALS<br>REGISTRATION <i>E. E. Leonenko; K. A. Rumyantsev; T. V. Khrabrova</i> .....                                                             | 440 |
| THE INFLUENCE OF THE ACOUSTIC BOUNDARY LAYER FORMATION PROCESS<br>ON THE PARAMETERS OF THE SOUND WAVE INTERACTING WITH THE LIQUID-SOLID<br>INTERFACE <i>F. F. Legusha; K. N. Pialov; G. V. Chizhov</i> ..... | 444 |
| SOUND VELOCITY DISPERSION OF A WAVE PROPAGATED IN MEDIUM WITH LOSSES<br>IN A CYLINDRICAL PIPE WITH HEAT-CONDUCTING WALLS<br><i>F. F. Legusha; G. V. Chizhov; K. N. Pialov</i> .....                          | 448 |
| DATA SCHEME MODEL FOR THE DIGITAL TWIN OF THE LIFECYCLE OF HYDROACOUSTIC<br>EQUIPMENT PRODUCTS <i>A. V. Shatokhin; Ya. A. Ivakin; I. A. Krasnikov</i> .....                                                  | 452 |
| ENVIRONMENTAL DIRECTION OF THE DIVERSIFICATION OF MILITARY AND ECONOMIC<br>POTENTIAL OF HYDROACOUSTIC INSTRUMENT ENGINEERING<br><i>A. V. Shatokhin; I. A. Seleznev; Ya. A. Ivakin</i> .....                  | 458 |
| MATHEMATICAL MODEL OF SHIP MOVEMENT IN DIFFICULT ICE CONDITIONS<br><i>E. M. Gramuzov; N. V. Kalinina; A. A. Kurkin</i> .....                                                                                 | 462 |
| MODERN METHODS OF ACOUSTIC INTENSIMETRY FOR ESTIMATION OF NOISE<br>POLLUTION OF THE ENVIRONMENT <i>D. L. Vinokurov</i> .....                                                                                 | 467 |
| MUTUAL INFLUENCE OF MAGNETIZED FERROMAGNETIC BODIES<br><i>B. M. Kondratenko; A. V. Strizhov</i> .....                                                                                                        | 472 |
| ON THE POSSIBILITY OF REDUCING THE INTENSITY OF CAVITATION NOISE EMISSION<br>OF PROPELLERS <i>V. P. Shchegolikhin</i> .....                                                                                  | 477 |

*Научное издание*

**ТРУДЫ XVI ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**«ПРИКЛАДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ГИДРОАКУСТИКИ И ГИДРОФИЗИКИ»**

Подписано в печать 06.02.2023 г.  
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 57,2. Тираж 50 экз.  
Заказ № 5900.

Отпечатано с готового оригинал-макета заказчика  
в ООО «Издательство “ЛЕМА”»  
199004, Россия, Санкт-Петербург, 1-я линия В.О., д.28  
тел.: 323-30-50, тел./факс: 323-67-74  
e-mail: [izd\\_lemma@mail.ru](mailto:izd_lemma@mail.ru)  
<http://www.lemaprint.ru>