



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ  
КОНЦЕРН МОРСКОЕ ПОДВОДНОЕ ОРУЖИЕ  
**ГИДРОПРИБОР**  
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ПОДВОДНОЕ МОРСКОЕ ОРУЖИЕ 2 (50) 2020



# ПОДВОДНОЕ МОРСКОЕ ОРУЖИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Специальный выпуск

4 (52)  
2020



Издается с 2003 г.

Санкт-Петербург – 2020 г.



# **ПОДВОДНОЕ МОРСКОЕ ОРУЖИЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Специальный выпуск

**4 (52)  
2020**



Издается с 2003 г.

Санкт-Петербург – 2020 г.

---

## **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

---

### **ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА – ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

**ФИЛИМОНОВ А.К.** – д.т.н., профессор, заместитель генерального директора по науке

### **ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА**

**МИХАЙЛОВ В.А.** – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник

**ПУГАЧЕВ С.И.** – д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник

### **ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ**

**СУДАРЧИКОВ В.А.** – канд. воен. наук, начальник центра организационно-методического и научно-технического сопровождения

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

**А.ЛНЕВ Ш.Г.** – академик, д.т.н., профессор, генеральный конструктор САПР АО «Завод «Дагдизель»

**АНТОНОВ В.Н.** – начальник отделения – начальник отдела – главный конструктор направления

**АНТОНОВ В.Н.** – к.т.н., заместитель главного конструктора направления

**ВШИНСКИЙ Б.С.** – начальник отдела

**ГЕССЕН В.Р.** – к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник

**ГОЛОВАНОВА М.В.** – к.т.н., с.н.с., ведущий научный сотрудник

**ДОБЫЧИН А.В.** – заместитель генерального директора по экономике и финансам

**ДМИТРИЧЕНКО В.П.** – к.т.н., с.н.с., начальник отделения – начальник отдела – главный конструктор

**КАБАНОВ А.И.** – к.т.н., с.н.с., заместитель генерального директора – руководитель направления

**КАТКОВ В.А.** – начальник отдела

**КОПТЕВ Б.А.** – к.т.н., начальник отделения – главный конструктор направления

**КРАСИЛЬНИКОВ Р.В.** – к.т.н., доцент, главный научный сотрудник

**КРИНСКИЙ А.Ю.** – начальник отдела – главный конструктор

**КУЗНЕЦОВ Д.И.** – д.т.н., профессор Военного учебного центра СПбГМТУ

**КУЗЬМИН А.С.** – к.т.н., с.н.с., главный специалист

**МАРТЫНОВ В.Л.** – д.т.н., главный специалист

**МАТВИЕНКО С.А.** – заместитель генерального директора по персоналу и социальной политике

**НЕКИШЕЛОВ Ю.А.** – канд. воен. наук, ведущий специалист

**НИКИТИН А.А.** – заместитель генерального директора – руководитель направления

**НИСНЕВИЧ М.З.** – к.т.н., главный конструктор поднаправления

**ПОГУДИН К.Г.** – к.т.н., ученый секретарь

**ПОЛЕНИН В.И.** – д.в.н., проф., заслуж. деят. науки РФ, проф. ВМА им. Н.Г. Кузнецова

**ПУЧНИН В.В.** – д.в.н., профессор, профессор кафедры ВМА им. Н.Г. Кузнецова

**РАМАЗАНОВ М.А.** – д.т.н., начальник сектора

**РЕПИН А.А.** – канд. воен. наук, главный научный сотрудник

**САВЕНКОВ Г.Г.** – д.т.н., профессор СПбГТИ (ТУ)

**СУХАРЕВ В.А.** – к.т.н., с.н.с., начальник сектора

**СУХОПАРОВ П.Д.** – заместитель генерального директора по ВЭД

**ТИХОНОВ Г.Б.** – начальник отдела

**ШЕСТАКОВ В.Д.** – к.т.н., доцент, заместитель главного конструктора

### **РЕДАКЦИЯ**

**ШАПОВАЛОВА А.Е.** – к.филол.н., ведущий научный сотрудник

### **КОМПЬЮТЕРНЫЙ ДИЗАЙН, ГРАФИКА И ВЕРСТКА**

**ЖЕЛНОВАЧ Л.Л.** – начальник лаборатории цифровой обработки информации

---

**На страницах сборника публикуются** обзорные статьи, методические разработки и аналитические материалы по актуальным научно-техническим вопросам развития морского подводного оружия (МПО), поднимаются проблемные вопросы и анализируются возможности АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор» по созданию новых образцов МПО.

Ответственность за достоверность информации, точность фактов, цифр и цитат несут авторы. При перепечатке сведений ссылка на сборник «Подводное морское оружие» обязательна.

---

## **СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК**

---

В специальном выпуске представлены результаты деятельности внештатной лаборатории фундаментальных и прикладных проблем морского подводного оружия, созданной в Концерне в 2018 г. Первые два года деятельности лаборатории были посвящены решению проблемных вопросов защиты подледной акватории Арктики и разработке методов сейсмоакустического мониторинга углеводородов на шельфе северных морей. Основным инициатором создания лаборатории и организатором ее работы стал доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ Леонид Евгеньевич Собисевич, который в 2020 году отмечает 90-летний юбилей.

---

## **ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ**

---

### **Общие положения**

1. Статьи принимаются в электронном виде при наличии сопроводительного письма от организации и экспертного заключения о допустимости открытой публикации.

2. В конце статьи должны быть указаны сведения об авторах (ученая степень, звание, в том числе почетное, место работы, должность), ключевые слова, рубрика.

3. Редакция обеспечивает экспертную оценку (рецензирование) рукописей. На основании рецензии и заключения редсовета рукопись принимается к печати, отклоняется или возвращается авторам на доработку. Корректур авторам не высылаются.

4. Авторский гонорар и оплата рецензирования рукописей не предусмотрены.

### **Оформление рукописи**

Текст статьи представляется в формате \*docx (\*doc). Количество страниц не более 15. Поля: верхнее, нижнее – 4 см, левое, правое – 3 см. Шрифт Times New Roman, размер 11 pt, междустрочный интервал одинарный, абзацный отступ 1 см, выравнивание по ширине.

В левом верхнем углу указывается УДК (10 pt, без отступа).

Через один интервал справа в алфавитном порядке указываются сведения об авторах: ученая степень, инициалы, фамилия (10 pt, курсив, фамилия прописными).

Через один интервал по центру печатается заголовок (11 pt, жирный, прописными).

Через один интервал размещается аннотация (8 pt, отступ 7 см, не более 10 строк, выравнивание по ширине).

Подзаголовки статьи размещаются по центру с 1 интервалом сверху и снизу (прописные буквы, жирный шрифт, курсив).

Рисунки и таблицы необходимо располагать по тексту в соответствии с ГОСТ 7.32-2001. Размер шрифта подрисовочного текста – 10 pt, названия таблицы – 11 pt.

Уравнения и формулы должны быть набраны в Microsoft Equation, расположены на отдельных строках и пронумерованы (в скобках справа).

Для маркированного списка в качестве маркера используется тире.

Ссылки на литературу приводятся в квадратных скобках [1]. Список цитируемой литературы располагается через 1 интервал после текста под заголовком «ЛИТЕРАТУРА» и составляется по порядку упоминания в тексте. Размер шрифта заголовка и списка 9 pt.

## СОДЕРЖАНИЕ

Патрушев В.В., Собисевич А.Л. Внештатная лаборатория фундаментально-прикладных проблем морского подводного оружия. Первые научные результаты .....	5
Собисевич Л.Е., Дмитриченко В.П., Лиходеев Д.В. Обзор современных арктических исследований стран НАТО в интересах военно-морских сил .....	12
Руденко О.В. Некоторые тенденции в развитии фундаментальных направлений нелинейной акустики .....	29
Разин А.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. Современные математические подходы в задачах анализа волновых процессов .....	38
Агафонов В.М., Дмитриченко В.П., Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. Предложения по созданию инновационной геоакустической антенной системы ледового класса для мониторинга арктических морей .....	54
Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Сейсмоакустический мониторинг глубинных структур морской среды при наличии ледового покрова на основе анализа распространения изгибно-гравитационных волн .....	64
Груздев П.Д., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А. Математическое моделирование и экспериментальные исследования распространения и трансформации поверхностных волн на границах раздела морской среды в ледовых условиях .....	73
Дмитриченко В.П., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А. Дистанционное зондирование морского дна при наличии ледового покрова .....	81
Авдюхина С.Ю., Агафонов В.М., Бугаев А.С., Груздев П.Д., Данилова В.Г., Егоров Е.В., Зайцев Д.Л. Сравнительные характеристики пьезокерамических и молекулярно-электронных приемников низкочастотных гидроакустических сигналов .....	91
Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. О возможности акустической маскировки морских мин .....	98
Гравиров В.В., Кислов К.В. Применение техники адаптивной фильтрации в геоакустических системах .....	102
Дмитриченко В.П., Калминский Б.Г. Оценка потенциальных возможностей обнаружения подводных лодок малогабаритными гидроакустическими буями .....	112
Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Гравитомангнитные поля, наводимые вихревыми образованиями винтовых летательных аппаратов .....	118
Гессен В.Р. О влиянии изгибно-колеблющейся структуры вблизи приемника звукового давления на его работу в турбулентном пограничном слое .....	127
Сухопаров П.Д. Монография академика В.В. Адудкина «Подводные и прибрежные взрывы» ..	133
Дмитриченко В.П. Юбилей ученого .....	139
Собисевич Л.Е. К вопросу о роли фундаментальных и прикладных исследований в создании морского подводного оружия .....	146
<b>АННОТАЦИИ</b> .....	153
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b> .....	157

*В.В. ПАТРУШЕВ, д.ф.-м.н. А.Л. СОБИСЕВИЧ*

### ВНЕШТАТНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНО-ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ МОРСКОГО ПОДВОДНОГО ОРУЖИЯ. ПЕРВЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В статье рассмотрены причины, побудившие к созданию в Концерне внештатной лаборатории, направления работ и задачи, поставленные перед лабораторией на 2018-2019 гг., а также кратко представлены результаты этих работ, более подробно изложенные в статьях сборника.

Весной 2017 г. президент России В.В. Путин провел в Сочи совещание по военно-оборонным вопросам, включающим проведение фундаментальных научных исследований двойного назначения, результаты которых используются в том числе и для создания новейших технологий в военной сфере. Было подчеркнуто, что инновационные научно-технические решения помогают Вооруженным силам РФ адекватно реагировать на существующие и потенциальные вызовы безопасности страны. Президент России предложил сосредоточить усилия ученых на вопросах создания перспективного научно-технического задела на основе прорывных технологий и в полной мере задействовать интеллектуальный потенциал всего научного сообщества нашей страны в интересах обеспечения обороноспособности государства.

Во всякой научной деятельности, в том числе направленной на обеспечение обороноспособности страны, всегда выделялись три составляющие: фундаментальная, прикладная и техническая. Фундаментальную науку, как правило, финансировало государство из госбюджета. Однако в бюджете новой России оказалось недостаточно средств, чтобы обеспечить финансирование развития всех необходимых направлений даже в области обороны. По крайней мере, в части поиска новых прорывных технологий по развитию морского подводного оружия за последние 30 лет фундаментальные работы практически не финансировались, а без таких работ крайне редко появляются новые

научно-технические решения, на основе которых возможно создание новейших образцов техники, в том числе военной. Утвержденной в 2015 г. комплексной целевой программой развития морского подводного оружия до 2025 г. было предусмотрено выполнение в 2016-2019 гг. ряда НИОКР, направленных на создание научно-технического задела для разработки новых образцов вооружения ВМФ. Однако финансирование было открыто только в 2019 г. и только по одной работе из всего перечня.

В этой обстановке АО «Концерн «МПО – Гидроприбор», на который возложена задача разработки новейших образцов минно-торпедного оружия, и сегодня остающегося самым эффективным средством противолодочной обороны, продолжает изыскивать возможности привлечения к решению этих проблем ведущих ученых страны. В отдельных случаях такие работы удавалось выполнять за счет весьма ограниченных собственных средств Концерна, а иногда и безвозмездно, учитывая альтруизм части нашего патристически настроенного научного сообщества. Наряду с развитием научно-технического задела по своей основной тематике Концерн постоянно ведет поиск возможностей создания двойных наукоемких технологий, без которых эффективная деятельность предприятий ОПК в будущем будет затруднена.

Следуя предложенной Российской академией наук концепции создания виртуальных лабораторий, в ноябре 2017 года



Концерн подписал соглашение о научном сотрудничестве с Российской академией наук. Данное соглашение предусматривает проведение совместных фундаментальных научных исследований с целью создания перспективного задела и развития инновационных подходов к решению проблем разработки средств противолодочной обороны и систем двойного назначения. Последовавшее за этим решение о создании внештатной лаборатории фундаментально-прикладных проблем морского подводного оружия в составе Концерна стало естественным продолжением работ в рамках соглашения, что позволило привлечь к исследованиям и разработкам ведущих ученых высшей школы и РАН на безвозмездной основе.

Следует отметить большую роль в организации этого взаимодействия с РАН и создании внештатной лаборатории Концерна доктора технических наук, профессора Леонида Евгеньевича Собисевича, деятельность которого вот уже много лет связана с «Гидроприбором». Руководителем внештатной лаборатории по согласованию с РАН был назначен сын Л.Е. Собисевича — член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук А.Л. Собисевич.

К моменту создания лаборатории в ряде институтов РАН уже имелся некоторый научный задел, сформированный в ходе реализации отдельных проектов Росийского фонда перспективных исследований и программ Президиума РАН. Важнейшей из них стала программа Президиума РАН «Фундаментальные исследования по созданию поисковых информационно-измерительных комплексов на основе рас-

пределенных антенных систем и скважинных обсерваторий в интересах защиты северных территорий России в сложных ледовых условиях», координатором которой является академик Ю.М. Михайлов. В рамках этой программы также решаются задачи, имеющее важное государственное значение в связи с промышленным освоением природных богатств, открытых на шельфе северных морей России. Необходимость комплексного решения проблем защиты Арктики в рамках даже этой программы определила целесообразность привлечения Концерна к ее выполнению.

Северный Ледовитый океан — это не только огромные запасы нефти и газа на морском дне, но и скрытый полигон для подводных ракетносцев вероятного противника, представляющих угрозу безопасности нашей страны (рисунок 1). Поэтому основные цели обозначенного проекта программы Президиума РАН связаны с развитием специализированных технологий, которые позволяют создать на их базе новое поколение геогидроакустических информационно-измерительных систем, функционирующих в сложных ледовых условиях. В естественных шумах моря содержится полезная информация, которая отражает внутреннюю структуру морского дна, водного слоя и находящихся в нем крупных протяженных неоднородностей (АПЛ). Мониторинг этих структур возможен с использованием распределенной группы комбинированных векторно-фазовых приемников, эффективно используемых в разработках «Гидроприбора» уже много десятков лет, а решение задач противолодочной обороны невозможно без использования подводного морского оружия.

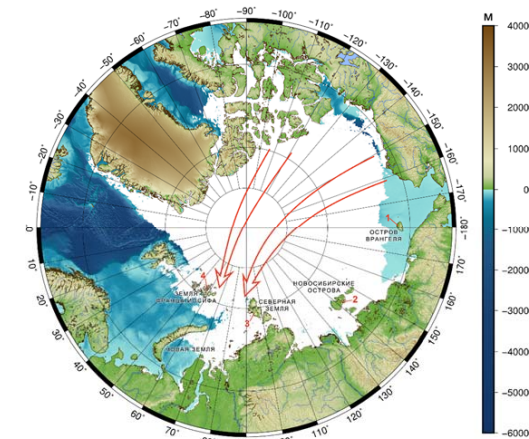


Рисунок 1 — Ледовая обстановка в северном полушарии в зимний период (стрелками показаны направления движения подводных ракетносцев вероятного противника)

Отметим, что научные исследования в Арктике, проводимые зарубежными учеными, обеспечены самыми современными автономными информационно-измерительными системами, а их заказчиком и конечным потребителем большинства новых научных результатов является Центр военно-морских исследований США (Office of Naval Research). Одной из основных целей деятельности этого Центра — использование результатов фундаментальных и прикладных работ для организации наблюдений, моделирования и прогнозирования состояния океана как потенциального театра военных действий, а также непосредственно для решения основных проблем, связанных с классификацией, обнаружением и поражением подводных лодок в сложных ледовых условиях.

Большие вызовы современности ставят перед учеными РАН и высшей школы, а также специалистами Концерна задачи проведения в рамках внештатной лаборатории теоретических и экспериментальных исследований по развитию новых геофизических технологий и информационно-измерительных систем, обеспечивающих мониторинг

слоистой среды северных морей в ледовых условиях. Следует отметить, что интерес к изучению сейсмоакустических волновых процессов в слоистой геофизической среде в последние годы значительно возрос, что продиктовано необходимостью учета требований геоэкологии, с одной стороны, и развитием новых технологий поиска месторождений полезных ископаемых на суше и в море — с другой. По согласованию с учеными и специалистами внештатной лаборатории в программу их деятельности на 2018-2019 гг. были включены исследования и разработки отдельного класса фундаментальных и прикладных задач, в том числе:

- проблемы геогидроакустики и геофизики морской среды, нацеленные на решение задач освещения подводной обстановки, включая акватории, покрытые льдом;
- изучение наведенных геогидроакустических полей обесшумленных ПЛ с выходом на развитие инновационных технологий освещения подводной и подледной обстановки;
- анализ состояния работ по снижению шумности и геогидроакустической заметности перспективных образцов МПО;

– разработка новых технологий геологоразведки и мониторинга месторождений углеводородов в труднодоступных районах тундры и на шельфе северных морей, а также других технологий двойного назначения.

– проведение поисковых исследований, связанных с созданием специализированных гидроакустических преобразователей и антенн МПО;

– решение сопутствующих фундаментальных задач, возникающих при создании перспективных боевых подводных систем.

Перечисленные научные проблемы определили план научной работы на первые годы деятельности внештатной лаборатории. При этом основными направлениями деятельности явились фундаментальные научные исследования в области геофизики, сейсмоакустики и гидроакустики, исследования существующих разработок и выход на создание отечественных инновационных технологий мониторинга глубинных структур подледной акватории на основе анализа полезной информации, содержащейся в естественных геогидроакустических полях. Учет наведенных волновых процессов при создании нового поколения подводных информационно-измерительных систем морского оружия связан с непрерывной оценкой помеховой обстановки в районе их практического использования.

Благодаря творческому вкладу ведущих ученых РАН в составе лаборатории достигнуто более глубокое понимание процессов трансформации низкочастотных геогидроакустических полей, наведенных локальными подвижными источниками в структурах типа «морское дно – водный слой – ледовый покров». Получили свое решение определяющие задачи приема полезных сигналов в условиях сложной помеховой обстановки, что может способствовать разработке новых технических предложений по использованию адаптивной фильтрации в информационно-измерительных системах морского подводного оружия.

Была проведена серия совместных натуральных экспериментов в условиях полигона с целью дальнейшего развития отечественных сейсмогидроакустических информационно-измерительных систем комплексного мониторинга тонкой структуры естественных и наведенных геогидроакустических систем ледового класса.

Проведенные работы доказали актуальность разработки и создания предлагаемой отечественной системы защиты северных территорий Российской Федерации. Основная проблема, определяющая возможность успешного предотвращения несанкционированного доступа на контролируемую территорию, неразрывно связана с задачами обнаружения малозумных АПЛ. При этом создание перспективных измерительных систем, способных обеспечить эффективное решение задач поиска и обнаружения подводных объектов, требует знания особенностей локальной геогидроакустической помеховой обстановки, формирующейся в слоистых структурах покрытой льдом акватории.

Развиваемая группой ученых внештатной лаборатории фундаментальных проблем при участии специалистов АО «Концерн «МПО – Гидроприбор» шумовая технология мониторинга слоистых структур северных морей и создание специализированного аппаратного обеспечения представляются актуальными, перспективными и экономически выгодными для РФ. Использование разрабатываемой технологии целесообразно при работах в высоких широтах, когда другие методы трудно реализуемы в мощных ледовых полях при необходимости круглогодичного мониторинга.

Нужно отметить, что все запланированные работы внештатной лаборатории были организованы с целью вовлечения молодых исследователей Концерна, РАН и высшей школы. Ряд результатов работ внештатной лаборатории за первые два года ее

деятельности представлен в данном сборнике. Успеху данного проекта во многом способствовало участие в нем академика О.В. Руденко и профессора Л.Е. Собисевича, которых отличают научный энтузиазм, патриотизм и активная гражданская позиция. Несомненный интерес представляют их размышления на страницах сборника о роли фундаментальных исследований в науке и технике, включая создание морского подводного оружия.

В ряде статей сборника рассмотрены фундаментальные основы изучения структуры геогидроакустических полей в условиях мелкого и глубокого морей с учетом наличия ледового покрова, на основе которых сформулированы предложения по решению актуальных задач обнаружения подвижных протяженных объектов (АПЛ) в подледной акватории Арктики и мониторинга структуры морского дна северных морей. Наряду с этим проведенный анализ позволил обосновать идентичность зарегистрированных сейсмогидроакустических шумов от ПЛ на глубине 400 м и на суше, что было обнаружено при испытаниях на полигоне ЦНИИ «Гидроприбор» в г. Гагры еще в 1960-е гг. Этот же факт указывает на

возможность обнаружения движущихся АПЛ подо льдами Арктики регистрацией сейсмогидроакустических шумов в шельфах северных островов. На основе этого же анализа обоснована возможность обнаружения летательных аппаратов из-под воды, что в ряде задач может найти практическое применение.

Совместно со специалистами Концерна молодые ученые внештатной лаборатории приняли участие в разработке, создании и испытаниях молекулярно-электронных модулей как элементов распределенных антенных систем ледового класса, способных контролировать обстановку в покрытых льдами северных морях. На фотографиях (рисунок 2) приведены фрагменты экспериментов с этими сейсмомодулями на Ладоге и на Байкале, где была продолжена отработка технологии пассивного мониторинга покрытого льдом водоема с использованием распределенной антенной системы ледового класса из этих приемников. Результаты фундаментальных исследований и перспективные макеты молекулярно-электронных модулей демонстрировались на ряде специализированных выставок (рисунок 3).



Рисунок 2 – Испытания макетов вмораживаемых геогидроакустических буйев и отдельных элементов дрейфующих антенных систем



Рисунок 3 – Демонстрация результатов совместных разработок, выполненных под эгидой лаборатории фундаментально-прикладных проблем, на выставке «АРМИЯ – 2018»

Нужно отметить, что на данный момент российская система глобальных наблюдений в Арктике, в том числе имеющая оборонное значение, несовершенна. Проведенные сотрудниками лаборатории исследования позволили установить, что приоритетным направлением в развитии систем контроля и охраны северных территорий России в сложных ледовых условиях является создание инновационных прорывных технологий эффективного мониторинга подледных акваторий северных морей с выходом на построение аппаратных комплексов, обеспечивающих создание в интересах национальной безопасности Российской Федерации высоко-технологичной продукции и организацию инновационных производств. В качестве таких комплексов могут выступать распределенные антенные системы, в составе которых используются буи ледового класса.

Другим актуальным направлением деятельности внештатной лаборатории явились фундаментальные научные исследования и разработки отечественных инновационных технологий мониторинга глубинных структур морского дна (в том числе запасов углеводородов в Арктике) на основе анализа информации, содержащейся в естественных

сейсмогидроакустических полях. В ряде статей сборника представлено решение проблем разработки принципиально новых технологий геологоразведки углеводородов на основе анализа микросейсмического шума, являющегося естественным источником информации о наличии локальных неоднородных образований в сложной геофизической среде, включая морское дно на шельфе северных морей. На основании теоретических и экспериментальных данных показано, что полезная информация о структуре морского дна определяется регистрацией поверхностных волн датчиками, вмороженными в лед. Новые фундаментальные результаты такого уровня получены впервые, и их внедрение будет иметь важное промышленное и оборонное значение. Освоение технологии и аппаратуры такой сейсморазведки может стать хорошей экономической поддержкой Концерна при сокращении объема гособоронзаказа.

В сборнике представлены также несколько статей по другим актуальным вопросам создания гидроакустических систем морского подводного оружия.

Большой объем работ по анализу и обобщению всех имеющихся материалов по подводным и прибрежным взрывам, включая

подрывы торпед с ядерными боезарядами на Новоземельском полигоне, был выполнен по просьбе Концерна академиком РАН Виталием Васильевичем Адушкиным. В результате его работы в 2019 г. была опубликована монография «Подводные и прибрежные взрывы», посвященная 75-летию образования НИИ-400 (ныне АО «Концерн «МПО – Гидроприбор») и получившая высокую оценку специалистов. Уже сейчас эта монография стала библиографической редкостью. В сборнике опубликована статья П.Д. Сухопарова об этой монографии.

В рубрике «Юбилей ученого» представлена статья о научной деятельности доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, лауреата Государственной премии, капитана первого ранга в отставке Леонида Евгеньевича Собисевича, явившегося инициатором создания в Концерне внештатной лаборатории фундаментально-прикладных проблем. 27 апреля сего года профессор Собисевич отметил 90-летний юбилей. Несмотря на преклонный возраст, Леонид Евгеньевич продолжает творческую научную работу, искренне переживая наметившееся отставание в развитии отечественного морского подводного оружия. Очень большое внимание он уделяет воспитанию молодых ученых, направляя их деятельность на

благо нашего отечества и обеспечение его обороноспособности.

По мысли Л.Е. Собисевича, усиление взаимопроникновения фундаментальных и прикладных знаний в современных условиях приводит к становлению качественно нового типа исследований, диалектически сочетающих в себе особенности этих двух традиционно противопоставляемых направлений. Развитие фундаментальных и прикладных военно-морских исследований должно идти в тесной взаимосвязи. Хотелось бы, чтобы дальнейшие работы внештатной лаборатории в еще большей мере способствовали решению этой задачи. Успешное функционирование лаборатории должно обеспечиваться научными кадрами высшей квалификации, для чего в Концерне осуществляется научно-методическое руководство аспирантами и соискателями.

Выражаем надежду, что выпуск данного сборника будет способствовать повышению заинтересованности молодых специалистов и ученых Концерна в развитии новых направлений разработки образцов морского подводного оружия, нацеленных на повышение обороноспособности нашей Родины, а также в создании инновационных двойных технологий, без которых будет невозможна дальнейшая успешная деятельность Концерна.

д.т.н. Л.Е. СОБИСЕВИЧ, к.т.н. В.П. ДМИТРИЧЕНКО,  
к.ф.-м.н. Д.В. ЛИХОДЕЕВ

## ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ АРКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРАН НАТО В ИНТЕРЕСАХ ВОЕННО-МОРСКИХ СИЛ

На основе анализа открытых зарубежных публикаций проведен обзор современного состояния и масштабов исследований, активно проводимых странами НАТО в Арктике, дана оценка их направленности на решение военно-технических проблем.

### ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие Арктика стремительно приобрела важнейшую экономическую и военную значимость для стратегических интересов РФ. Являясь крупнейшим арктическим государством с самой протяженной границей в этой части мира, Россия обязана отвечать на вызовы, которые несет обострившееся в последнее время геополитическое соперничество.

Сегодня можно выделить четыре основных фактора, определяющих резкое возрастание значимости Арктики для РФ.

Во-первых, это сохраняющийся в настоящее время юридически неопределенный статус национальных границ в регионе.

Во-вторых, богатство находящихся в его недрах ресурсов, в первую очередь углеводородов, запас которых у России заметно превосходит запасы других стран (рисунок 1).

В-третьих, стратегическое значение Северного морского пути и других транспортных артерий арктического региона.

В-четвертых, обеспечение обороноспособности РФ в арктическом регионе в связи с «открывающимися» северными границами. Этому фактору в обсуждениях арктической проблематики уделяют мало внимания, в отличие от предыдущих трех, хотя за последние годы он стал определяющим при выработке арктической стратегии России.

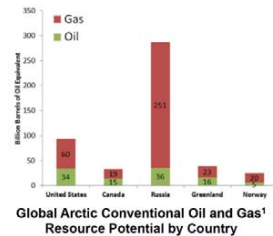
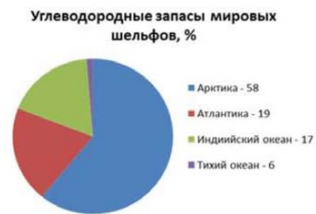


Рисунок 1 – Сопоставительный анализ мировых запасов углеводородов в Арктике

За последнее десятилетие наблюдается резкое сокращение льдов в северных морях. В случае сохранения темпов таяния льда к 2030 году возможно освобождение большей части Арктики от сплошного ледового по-

крова. А это означает, что арктические регионы, ранее труднодоступные для ядерного подводного флота США, Великобритании и других стран, в ближайшей перспективе станут местом базирования атомных подводных

лодок (АПЛ), которые смогут вплотную подходить к нашим северным границам.

В связи с этим на первый план выходит необходимость разработки методов и средств многопараметрического мониторинга северных морей, покрытых льдом, обеспечивающих поступление актуальной информации о пространственно-временной изменчивости геофизических полей с выходом на раннее обнаружение малозумных АПЛ и предотвращение их доступа в контролируемые нами акватории. Решение этой государственной проблемы должно основываться на постоянном теоретическом и экспериментальном исследовании волновых процессов различной природы в сложно построенной гидрофизической среде Арктики. Работы должны быть подкреплены и построением соответствующих оборонительных систем на островах северных морей.

В прошлом веке отечественные ученые внесли определяющий вклад в научное изучение Арктики. Однако с начала 1990-х годов всякая активность РФ в арктической зоне пришла в полный упадок. В настоящее время Правительство РФ и Министерство

обороны восстанавливают участие России в международных исследованиях Арктики. Сохранившийся опыт, научная арктическая школа, а также новые исследования и прикладные разработки вселяют надежду на восстановление приоритета РФ на всех наших территориях.

В то же время за последние десятилетия западные ученые не теряли времени даром: они значительно увеличили свою активность в Арктике. С конца XX века проводится крупномасштабное изучение различных гидрофизических полей в слоистых, покрытых сплошными льдами районах Арктики. Для этого используются самые современные системы наблюдения, позволяющие в режиме, близком к режиму реального времени, измерять и передавать через каналы спутниковой связи информацию о значениях параметров водного слоя, льда и приземного слоя атмосферы. Судя по информации из открытых источников, в Арктике сегодня работают сотни автономных информационно-измерительных систем. Можно предположить, что в реальности их существенно больше (рисунок 2).

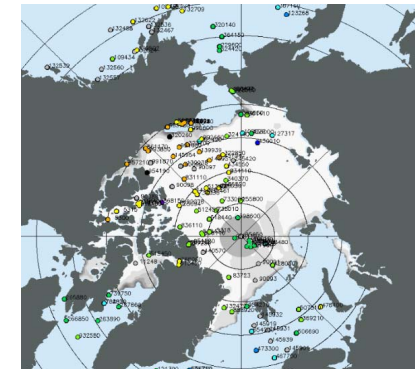


Рисунок 2 – Система буев (местоположения буев отмечены точками с номерами), развернутая в настоящее время в центральной части Арктики в рамках программы «International Arctic BuoY Program» [1]



Подобного широкомасштабного инструментального изучения арктического региона никогда ранее не проводилось. Конечно же, эта информация используется не только для анализа назревших экологических проблем Севера, связанных с глобальным потеплением и таянием льдов. Результаты проводимых исследований уже положены нашими потенциальными противниками в основу крупномасштабных учений ВМС США, направленных на изучение определяющих факторов, влияющих на боевое применение АПЛ и ПЛПРБ в Арктике («следовые учения» Ice Exercise, или сокращенно ICEX, см. рисунок 3).

Одно из учений подобного рода состоялось в марте 2016 года (ICEX 2016). Участниками учений стали около 200 специалистов из более чем 35 специализированных организаций, представляющих США, Великобританию, Канаду и Норвегию. ВМС США выделили на учения две современные подводные лодки оперативного реагирования типа «Лос-Анджелес».



Рисунок 3 – Вид на научно-исследовательский лагерь, совмещенный с командным пунктом, развернутый в рамках учений (ICEX 2014), направленных на исследование Арктики в интересах испытания новых образцов вооружения подводных лодок

В заключение этого раздела обозначим основных соперников России в арктическом регионе.

Командующий подводными силами ВМС США вице-адмирал Джозеф Е. Тофало основными целями учения назвал демонстрацию присутствия, получение дополнительного опыта работы в арктических условиях, дальнейшее расширение партнерства в области научных исследований в Арктике.

Истинные же цели были четко озвучены начальником Центра развития приемов подводной войны (Undersea Warfighting Development Center) контр-адмиралом Джеффом Трасслером: «Наша арктическая подводная лаборатория остается **мировым лидером в области подводных арктических операций**. ICEX 2016 – **продолжение развития подводного вооружения и тактики во всех районах Мирового океана**».

Следует предположить, что дальнейшее исследование физических процессов в Арктике будет направлено именно на изучение влияния определяющих физических полей на особенности боевого применения морского подводного оружия в арктических широтах.

В первую очередь это арктические прибрежные государства: США, Канада, Дания и Норвегия.

Вторую группу составляют субарктические государства, не имеющие выхода к Северному Ледовитому океану: Финляндия, Швеция, Исландия. За счет наращивания своей активности в международных организациях эти страны стремятся повысить свое влияние на режим освоения ресурсов шельфа и оспорить статус Северного морского пути и Северо-Западного прохода.

Третью категорию оппонентов образуют неарктические государства, географически удаленные от региона: Китай, Республика Корея, Япония, Индия, Сингапур, Германия, Великобритания, Франция, Италия и Нидерланды. Они тоже настойчиво пытаются влиять на арктическую политику, продвигая тезис об Арктике как «достоянии всего человечества».

Отметим, что КНР проявляет чрезвычайно высокую активность в Арктике. Так, например, при поддержке Норвегии КНР уже удалось разместить на Шпицбергене свою полярную станцию и исследовательский ледокол. В 2012 году Китай заключил соглашение о свободной торговле с Исландией, и последняя поддержала идею вхождения Китая в Арктический совет на постоянной основе, поскольку Арктика **«перестала быть региональной, а стала глобальной темой»**. Китай также планирует приобрести у Исландии остров Колбейниси, владение которым позволяет ему претендовать на статус арктической страны.

Четвертую категорию соперников РФ в Арктике составляют институциональные игроки, прежде всего ЕС и НАТО. Евросоюз наряду с Китаем может рассматриваться в качестве самых ярких сторонников интернационализации Арктики. Североатлантический альянс, все активнее вовлекающийся в арктическую политику, пытаются использовать для защиты собственных интересов малые арктические государства (Норвегия, Дания), не обладающие возможностями напрямую противостоять России. США также подталкивают НАТО к расширению присутствия в Арктике, стремясь противопоставить эту структуру Арктическому совету, где они

не обладают необходимым влиянием. И поскольку в НАТО состоят четыре из пяти активных игроков на арктическом пространстве (Дания, Канада, Норвегия, США), очевидно, что превращение этой организации в самостоятельного игрока, с точки зрения РФ, существенным образом ухудшает расстановку сил в регионе.

Наконец, острая конкуренция намечается у России и с членами самого Арктического совета. Переход в 2015 году председательства в этом объединении к США, уже обозначившими в составе совета некий «центр» из пяти стран (США, Норвегия, Швеция, Исландия и еще одной неназванной страны, но явно не России), который и «станет ядром» освоения Арктики, вполне очевидно свидетельствует о растущем расхождении позиций этой организации с российскими интересами.

Общий вывод, который можно сделать в этой ситуации, заключается в том, что в Арктике при любом раскладе сил Россия с большой вероятностью окажется без надежных союзников. И потому в процессе любых арктических переговоров одним из главных аргументов будет наличие военной силы в регионе, способной эффективно действовать для обеспечения стратегических интересов РФ. Основой этой эффективности должны стать и современные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы отечественных ученых, направленные на теоретическое и экспериментальное исследование геоакустических волновых процессов в условиях Арктики на базе постоянно действующих ледовых лабораторий.

В свете изложенного необходимо отдать должное нашим ученым, которые в рамках ограниченного финансирования ведут научные исследования в Арктике. Основой этих работ в плане решения фундаментальных задач следует считать финансовую поддержку РФФИ и программ Президиума РАН, направленных на развитие технологий двойного назначения [2, 3].

Выполняемые работы уже сегодня позволяют выходить на создание отечественных инновационных технологий и специализированных боевых систем нового поколения. Такие системы позволят России, с одной стороны, стать равноправным участником в изучении Арктики, а с другой – открывают новые направления в развитии перспективных боевых систем ВМФ и систем защиты северных границ от нежелательного вторжения со стороны наших потенциальных противников.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР В АРКТИКЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БОЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДВОДНОГО ФЛОТА СТРАН НАТО**

Подводные лодки ВМС США уже более 50 лет занимаются изучением условий плавания и применения минно-торпедного и ракетного оружия в Арктике. В ходе регулярных арктических походов осуществляется отработка оперативных возможностей глобального маневра разнородных сил и средств между Тихоокеанским и Атлантическим флотами. Проводится слежение за деятельностью ВМФ России в этом районе.

Сбор информации об определяющих характеристиках потенциального театра боевых действий в Арктике включает при этом и научное направление. Активные регулярные научные исследования в интересах ВМС США здесь начались в 1994 года, когда была утверждена 5-летняя программа сотрудничества ВМС и ученых в рамках проекта «Научные ледовые экспедиции» (Scientific Ice Expeditions, или сокращенно SCICEX) по исследованию окружающей среды, для которых были выделены многоцелевые АПЛ типа «Стерджен».

Уже первое пробное походы АПЛ показали высокую эффективность такого сотрудничества. В дальнейшем экспедиции подводных лодок «Кавалла», «Поджи», «Арчерфиш» и «Хокбилл», в котором принимали участие выдающиеся гидрофизики

и океанологи, позволило ВМС США получить уникальную научную информацию по геологии, физике, химии и биологии Арктического региона, динамике ледового покрова, циркуляции вод и батиметрическим характеристикам Ледовитого океана. Эти новые научные данные использованы при изучении влияния природных факторов на условия боевого применения АПЛ и их вооружения в арктических широтах.

Высокая мобильность АПЛ обеспечила получение уникальных научных данных и позволила собрать образцы из недоступных ранее областей, включая арктические маршруты общей протяженностью более 100 000 миль.

На первом этапе, в конце прошлого века, исследования проводились в околополюсном районе и в море Бофорта. Продолжение исследований последовало в 2000-2005 гг.

В июне 2010 г. начался второй этап программы SCICEX (Phase II Science Plan – U.S. Arctic Research Commission), выполнение которого обеспечивала АПЛ «Топека». И здесь следует отметить, что если в начале 1990-х гг. для научных исследований использовалось только штатное вооружение подводных лодок, то начиная с 1997 г. последние стали оснащаться приборами, позволяющими более полно выполнять задачи научных исследований.

Район исследований включал пять маршрутов («коридоров»), пролегающих через Северный Ледовитый океан (рисунок 4). Приоритет в исследованиях был отдан маршруту № 1, как кратчайшему для междуатлантического маневра АПЛ, включая Атлантический и Тихий океаны, а также морю Бофорта, где, по многолетним наблюдениям, происходят наиболее значительные изменения ледового покрова и климата. Исследования на маршруте № 1 было рекомендовано проводить не реже одного раза в год, а также при каждом междуатлантическом переходе подводных лодок из Атлантики в Тихий океан и обратно.

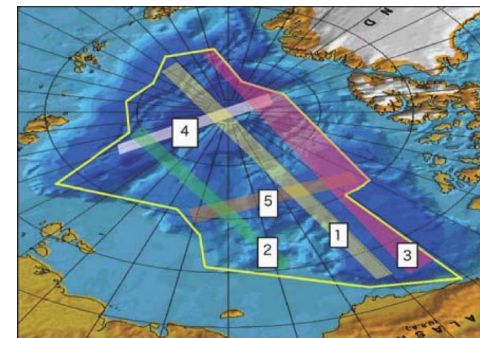


Рисунок 4 – Маршруты исследования Северного Ледовитого океана американскими АПЛ в рамках проекта программы SCICEX

Второй по значимости район для исследований (маршрут № 4) – транспортные пути от российского побережья в сторону Северного полюса.

Маршруты № 2, 4 и 5 рекомендовано исследовать попутно при каждом переходе АПЛ из Атлантического океана в Тихий. Меньшее внимание отводилось маршруту № 3, который рекомендовано исследовать только в рамках учения ISEX с периодичностью один раз в 2-3 года.

Данные научных исследований на маршрутах поступают в Арктическую подводную лабораторию ВМС США, где обрабатываются и используются при разработке перспективных образцов минно-торпедного и ракетного вооружения для всех классов АПЛ.

В ходе выполнения программы SCICEX были обследованы хребет Ломоносова со стороны котловины Макарова, хребет Менделеева, котловины Амундсена и Макарова. Анализ новых научных данных, полученных при проведении маршрутов плавания подводных лодок в ходе выполнения программы SCICEX позволяет говорить о том, что ВМС США проявляют большой интерес к российскому сектору Арктики. Наряду с картографированием морского дна и получением данных о состоянии водной

среды исследуются условия, влияющие на использование всех классов современного вооружения подводных лодок.

Логическим продолжением исследований в рамках программы SCICEX стали учения ВМС США, направленные на изучение Северного Ледовитого океана в интересах испытания новых образцов минно-торпедного и ракетного вооружения АПЛ на основе результатов научных исследований водной среды, расширения сведений о гидрофизических условиях региона, их влиянии на применение оружия и технических средств ПЛ. К учениям ISEX на регулярной основе привлекаются подводные лодки типа «Лос-Анджелес», «Си-Вулф» и «Вирджиния» Атлантического и Тихоокеанского флотов США. Цель этих многоплановых учений – исследование, испытание и оценка эксплуатационных возможностей, а также проверка готовности к действиям подводных сил ВМС США в Арктике во взаимодействии с союзниками. Научные наблюдения в ходе учений проводятся как на борту АПЛ, так и с ледовых площадок, на которых размещается временный лагерь, частично выполняющий функции командного пункта. Ведущей организацией, осуществляющей руководство учениями, является Арктическая лаборатория подводных сил ВМС США



(Arctic Submarine Laboratory – ASL), базирующаяся в Сан-Диего.

Учения ICEX проводятся регулярно в течение последнего десятилетия (2009, 2011, 2014, 2016, 2017 гг.). Постоянно увеличивается количество участников в составе объединенного научно-исследовательского коллектива с привлечением специализированных организаций и федеральных агентств США.

Один из наиболее важных элементов программы учений – испытание поведения акустических систем (ССН) торпед в арктических водах. Значительное изменение гидроакустических условий вследствие перепадов температуры воды на различных глубинах и изменения солености, вызванное речными стоками и таянием льда, во многом отличает поведение ССН торпед от условий умеренных широт. Проведенные испытания и анализ записи регистраторов показали пути совершенствования ССН торпед, позволили оценить возможность их обнаружения и способность акустических систем отличать фактические цели от нижней кромки льда и других помех. Кроме того, данные, полученные от гидрофонов и датчиков торпед, позволили проанализировать тактику действий АПЛ и способствовали повышению эффективности их действий в Арктике.

В ходе учений была испытана новая совместная разработка Арктической подводной лаборатории и Морского инженерного управления (Ocean Engineering

Department) с участием лаборатории прикладной физики Вашингтонского университета, позволившая увеличить дальность обнаружения подводных лодок и улучшить их классификацию. Эта аппаратура (Submarine Synchronous Transmitter – SST) показала наибольший эффект при сопряженном ее использовании с гидроакустическим комплексом, смонтированным на ледовом поле. Не менее важной частью учений стало испытание аппаратуры для определения состояния подводной части ледового покрова. Это особенно важно для подводных лодок, базирующихся на тихоокеанском театре, вынужденных преодолевать мелководный Берингов пролив в подводном положении.

По мере необходимости отрабатывались приемы всплытия подводных лодок ВМС США в позиционное и надводное положение во льдах, тестирование каналов связи с берегом и между собой, визуальное наблюдение за надводной обстановкой или вентилирования ПЛ (рисунки 5, 6). Успешность этих маневров во многом зависела от толщины льда и его подводной конфигурации. В целях поиска наиболее благоприятных условий для всплытия и определения конфигурации подводной части ледового поля была испытана гидроакустическая аппаратура «Ice Keel Avoidance» (ИКА). Испытание систем связи и навигации проводилось на предмет определения негативных факторов среды, способных снизить эффективность их действия.



Рисунок 5 – Атомная подводная лодка «Хэмптон» типа «Лос-Анжелес» после всплытия во льдах близости ледового лагеря «Наутилус» во время учения ICEX 2014 г.



Рисунок 6 – Встреча представителей научно-исследовательского коллектива с экипажем подводной лодки «Хэмптон» (слева) и вертолетное обеспечение (справа) в рамках учений ICEX 2016 г.

В процессе учения ICEX проверялось новое оборудование подводных лодок и аппаратуры ледового лагеря, определялась подготовка экипажей АПЛ для ведения подводных операций (рисунки 7-9). В частности, было произведено испытание установленной на АПЛ «Нью-Хэмпшир» новой версии высокочастотного гидролокатора, обеспечивающего более безопасное подледное плавание в условиях Арктики.

Начальник отдела военно-морских исследований (Office of the Naval Research – ONR) контр-адмирал Невин Карр отметил по результатам проведения этих учений: «Крайне важно, чтобы наши **подводные лодки были хорошо оснащены для защиты интересов США в этом стратегически важном регионе.** ONR тесно сотрудничает с Арктической подводной лабораторией ВМС в области экспериментальных научных и технических разработок, способных улучшить навигацию, связь и военно-морские операции в суровых условиях Арктики». Систематический сбор информации, получаемой от спутников, воздушного, надводного и подводного наблюдения, и ее анализ позволили улучшить прогнозирование меняющейся обстановки в Арктике и тем самым обеспечить эффективное действие американских АПЛ на прогнозируемом театре боевых действий в Арктике.

Все последующие учения ICEX 2014 г и другие включали плановый сбор данных об окружающей среде на маршруте перехода и в районе ледового лагеря, проверки аппаратуры слежения за подводными лодками и т. п. Учения предусматривали плавание подводных лодок на различных глубинах, поиск полостей и разводий, всплытия в них и швартовки к припайному льду, тестирование гидроакустической аппаратуры, средств связи и навигации. Впервые для связи с ледовым лагерем была использована электронная почта, которая позволила более оперативно обрабатывать полученную информацию и передавать ее военно-морскому командованию и в арктическую лабораторию. За ходом учений наблюдали несколько членов конгресса США и представителей оборонных ведомств. В частности, одним из наблюдателей был член комитета Сената по вооруженным силам американский сенатор Ангус Кинг, который заявил, что «США должны быть готовы к тому, чтобы противостоять любым проблемам, которые могут возникнуть в будущем, и именно поэтому учения ICEX имеют решающее значение. **Северный Ледовитый океан приобретает все большее стратегическое значение для Соединенных Штатов.** Здесь не только пролегают границы нескольких государств, в

том числе США, России, Канады, Норвегии и Дании, – он служит важным водным путем между Атлантическим и Тихим океанами. Таяние арктических льдов создаст



Рисунок 7 – Ледовый научно-исследовательский лагерь, совмещенный с командным пунктом, на учениях ICEX 2016 г.

В 2016-2017 гг. учения ICEX были продолжены. Участниками учений стали около 200 специалистов из более чем 35 организаций стран США, Великобритании, Канады и Норвегии, что является рекордным для экспериментов подобного рода. В качестве приоритетных задач учения назвались комплексное тестирование аппаратуры подводных систем; совершенствование взаимодействия различных оборонных ведомств (военно-морских сил, министерств обороны и др.), участвующих в реализации национальных целей в регионе; расширение состава участников этого процесса. Участие в учениях приняла команда Центра военно-морских исследований ВМС США. В ее задачу входило изучение процессов льдообразования, плотности и толщины льда с целью определения местоположения перспективных ледовых полей для обустройства ледовых лагерей при проведении подобных учений, которые будут планироваться через 2-3 года. После проведения активной фазы исследований подводные лодки остались в бассейне Северного Ледовитого океана, где продолжили самостоятельные исследования.

потенциал для открытия глобальных судоходных маршрутов, новых энергетических рынков и других коммерческих интересов».

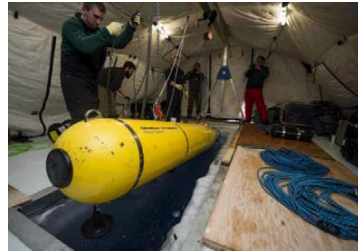


Рисунок 8 – Запуск автономного подводного измерительного комплекса (Underwater Unmanned Vehicle) в рамках учений ICEX 2016 г.

Следует ожидать, что последующие учения ICEX должны продолжить изучение факторов, влияющих на боевое применение подводных лодок в Арктике. Поскольку ледовые условия ограничивают действия в Арктике ВМС США именно этим классом кораблей, надо полагать, что в ближайшие годы приоритет в изучении условий Арктики будет отдан подводным лодкам, а дальнейшее исследование физико-географических условий наряду с общими задачами будет преследовать цель изучения их влияния на боевую деятельность АПЛ в арктических широтах.

Активное использование подводных лодок США в изучении Арктики в рамках проектов SCICEX, а также в учениях ICEX свидетельствуют о подготовке ВМС США к использованию военной силы в ходе возможных конфликтов и приобретению доминирующего положения в арктическом регионе. Активизация деятельности подводных лодок США в восточном секторе Арктики направлена на его освоение как театра военных действий и проведение мероприятий оперативной и боевой подготовки, в ходе

которых осуществляется сбор, анализ и передача в Арктическую подводную лабораторию разнообразной оперативной информации. При проведении учений производится испытание оружия, мобильных систем навигационно-гидрографического обеспечения, поиска и обнаружения под-

водных лодок. Особое внимание руководство ВМС уделяет отработке тактических приемов поиска и слежения в сложных арктических условиях, созданию систем разведки и мониторинга, накоплению ресурсов для последующего плотного участия в освоении Арктики.



Рисунок 9 – Полярные медведи исследуют поверхность АПЛ (слева) и вносят коррективы в постановку исследовательского оборудования (справа)

Информация о работах наших вероятных противников в Арктике была почерпнута из многочисленных журнальных статей и отдельных опубликованных в печати научных материалов. Здесь не приводятся конкретные научные результаты многолетних масштабных экспериментов американских военных и обслуживающих их ученых из отдельных лабораторий и промышленных фирм, занимающихся созданием современного приборного обеспечения, поскольку эти материалы закрыты. А это значит, что настало время нашим НИИ и КБ включиться в борьбу, ликвидировать существующие разногласия и договорится о совместных работах в Арктике.

#### **ОСНОВНЫЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ПРОГРАММЫ ИЗУЧЕНИЯ АРКТИКИ В ИНТЕРЕСАХ ВМС СТРАН НАТО**

Бюджет научно-технических работ (Naval S&T Funding) американского департамента военно-морских сил (Department of the Navy) оценивается в среднем более двух

миллиардов долларов в год, что составляет примерно 1% от всего бюджета военно-морских сил США [4]. Финансирование же полного цикла арктических исследований начиная с фундаментальных работ, создания, тестирования и заканчивая практической апробацией перспективных образцов специального оборудования в северном исполнении (Naval Research, Development, Test and Evaluation, RDT&E) составляет в среднем 16 миллиардов долларов в год. Основные разработки контролирует Центр военно-морских исследований (Office of Naval Research, ONR), который является единственным в своем роде военным департаментом, объединяющим и контролирующим финансирование трех основных этапов исследовательских работ, включающих фундаментальные исследования, прикладные исследования и разработку перспективных технологий и образцов. В этом случае удастся наиболее эффективно выстроить всю цепочку взаимодействия начиная с концептуальной идеи и заканчивая экспериментальной апробацией действующего прототипа. За счет

этого удастся выстроить эффективный, гибкий и максимально быстро реагирующий на внешние запросы механизм научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Созданный четко отлаженный механизм в совокупности с огромным финансированием открывает практически неограниченные возможности для перевода перспективных фундаментальных исследований в практическую плоскость новых военных технологий, которые становятся решающим компонентом военно-морского потенциала нашего основного потенциального противника.

И здесь важно отметить, что определяющая роль в формировании этого потенциала отводится именно **фундаментальным научно-исследовательским работам**.

В связи с наблюдаемыми изменениями климатических условий в Арктике обоснована основная стратегическая задача, которую ставит перед Центром военно-морских исследований его военное руководство. Сегодня она заключается в разработке нового поколения методов и средств, обеспечивающих более точный и при этом более долгосрочный прогноз изменений основных параметров океана, атмосферы и прибрежных зон, для обеспечения эффективного применения минно-торпедного и ракетного вооружения военно-морскими силами в этом регионе с учетом наблюдающихся изменений.

Решение этой масштабной задачи идет несколькими путями.

Во-первых, разрабатывается система круглогодичных наблюдений в Арктике при помощи сети автономных измерительных систем.

Во-вторых, создаются единые центры сбора и обработки данных измерений, в которых сортируется и изучается получаемая информация. Она оперативно используется для формирования глобальной модели арктического региона, описывающей основные гидрофизические параметры как для текущего времени, так и для формирования прогнозов.

В-третьих, проводятся крупные натурные эксперименты, цель которых –

совершенствование существующих и разрабатываемых моделей, с последующим практическим применением получаемых научно-технических результатов для решения различного рода боевых задач.

Основные научно-технические работы в арктическом регионе организуются и проводятся Центром военно-морских исследований в рамках арктической исследовательской программы (ONR Arctic Research Program). В рамках этой программы следует выделить следующие основные направления:

- разработка новых технологий (системы наблюдений, датчики, связь) для обеспечения круглогодичного наблюдения в Арктике, в том числе для измерения основных физических параметров атмосферы и океана, а также для проведения вспомогательных операций;

- проведение теоретических и экспериментальных работ для более точного понимания физических процессов, происходящих в Арктике, в числе которых процессы взаимодействия океана и атмосферы;

- разработка новой динамической полностью интегрированной модели Арктики, включающей океан, ледовый покров, волновые процессы на границах «дно – океан – атмосфера», с целью более точного прогнозирования пространственно-временной изменчивости арктического региона. Используются как различные экспериментальные данные, получаемые при контактных измерениях в море, на льду, в атмосфере, так и результаты дистанционного зондирования, в том числе со спутниковых радаров, в рамках единой интегрированной модели прогнозирования состояния Арктики.

Наметившийся в итоге прогресс в области арктических технологий будет положен в основу создания глобальной системы наблюдений в Арктике (Arctic Observing Network), которая обеспечит поддержку научно-техническим исследованиям, а также позволит создать робастную прогностическую модель, описыва-

ющую с требуемой точностью пространственно-временную изменчивость среды в этом регионе.

В сфере разработки технологий зондирования арктической среды акцент ставится на развитие автономных, в том числе роботизированных, станций, способных обеспечить постоянные наблюдения, которые требуются для научных исследований, используются при организации долговременного мониторинга исследуемых регионов, а также в прогностических моделях, например для наложения априорных ограничений на получаемые

результаты численных расчетов. Некоторые элементы глобальной системы наблюдений в Арктике уже развернуты и успешно функционируют. Наиболее перспективными из них для мониторинга океана являются, по-видимому, автономные подводные аппараты (AUV, глайдеры), вмораживаемые в лед вертикальные системы наблюдений (Ice-Tethered Profilers), а также дрейфующие автономные датчики-«нырки» (Polar Profiling Floats). Особую роль занимают исследования, проводимые при участии АПЛ и авиации (рисунок 10).

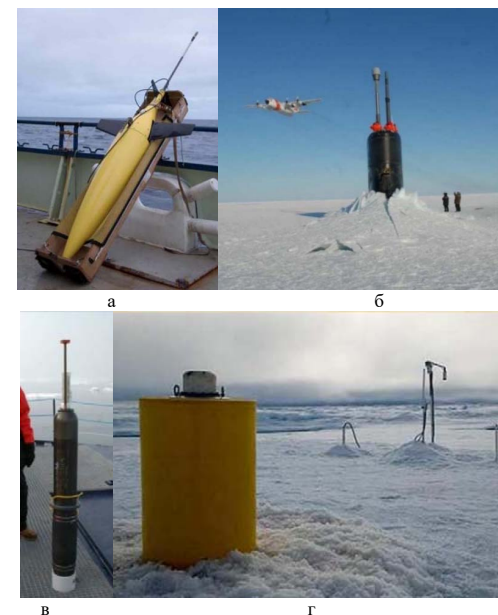


Рисунок 10 – Работы в ледовых условиях: а – глайдер; б – АПЛ во время исследовательской экспедиции; в – «нырок»; г – верхняя часть вмораживаемой вертикальной антенны (слева) и датчики контроля параметров льда (справа)

Основной тенденцией является все большее использование автономных измерительных станций. Если раньше для измерений

привлекались ледоколы, а сами измерения проводились преимущественно со льда и требовали постоянного присутствия научного и



инженерного коллектива, что, в свою очередь, ограничивало время проведения экспериментов, то сейчас использование автономных станций позволяет проводить исследования без участия человека вообще, а данные натурных наблюдений собирать и обрабатывать дистанционно.

Все измерения производятся в автоматическом режиме, данные измерений накапливаются также автоматически, после чего информация передается для обработки и анализа в научно-исследовательские центры, расположенные в

разных уголках Земли. Это качественно новый уровень технологического обеспечения научно-исследовательских работ по изучению Арктики. Ключевым моментом полярных систем наблюдений является механизм передачи данных от датчиков на пункты обработки информации, а также способы геогидролокации подводных автономных аппаратов. Обе эти задачи должны решаться в режиме, близком к режиму реального времени (рисунок 11).

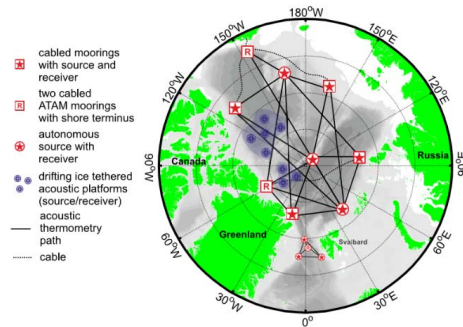


Рисунок 11 – Многофункциональная акустическая сеть, создание которой предполагается в рамках глобальной интегрированной системы наблюдений в Арктике (Arctic Observing Network) [5]

Для решения основных задач западные исследователи разработали и успешно используют два способа передачи информации. В одном случае в качестве промежуточного звена используются ледовые трансиверы, имеющие подводную и надледную части, способные принимать информацию с подводных аппаратов и передавать ее через каналы спутниковой или радиосвязи, а также передавать информацию в обратном направлении. Другой возможный вариант заключается в использовании донных закоренных станций, информация через которые передается посредством кабельного соединения с береговым центром сбора и обработки информации. Важную роль играет

возможность передачи информации между самими подводными аппаратами. Помимо локальных систем связи, предполагается создание глобальных акустических систем, позволяющих, с одной стороны, обеспечить акустическую связь на больших и сверхбольших расстояниях, а с другой стороны – использовать эти же системы для проведения акустического мониторинга арктических акваторий методами акустической томографии.

Разработка автономных подводных дронов проводится не только для научно-исследовательских целей, но и для решения задач, связанных с боевым применением. Так, компания «Боинг» анонсировала разработку

подводного автономного аппарата нового поколения, способного функционировать подо льдами в течение нескольких месяцев благодаря использованию гибридных перезаряжающихся энергетических блоков и специальной модульной конструкции грузовых отсеков (рисунок 12).

К слову, «Боинг» занимается разработкой и операционным управлением подводных необитаемых аппаратов с

1960-х гг. В отличие от предыдущих разработок новая версия автономного подводного аппарата не требует привлечения специальных надводных кораблей и обученной команды для запуска, операционного сопровождения, а также для поднятия системы после ее возвращения из экспедиции, что, как правило, требуется для большинства других автономных подводных аппаратов UUV (рисунок 13).



Рисунок 12 – Модификация автономного подводного аппарата Echo Voyager для долговременных комплексных подводных исследований [6]



Рисунок 13 – Спуск автономного подводного аппарата (UUV) с борта корабля (слева) и командный пункт управления маневрами UUV (справа)

В этом случае использование дронов нового поколения снижает операционные затраты на обеспечение их деятельности, а также переводит научно-технические работы по исследованию Арктики на все более автоматизированный уровень.

По-видимому, разработка Echo Voyager проводится в рамках реализации концепции создания большого автономного подводного аппарата, заказчиком которого является Центр военно-морских исследований ONR (рисунок 14).

Другим примером автономных подводных аппаратов, разрабатываемых для ВМС США, являются дроны малых размеров (Micro-UUV). Эти разработки, в отличие от Echo Voyager от компании «Боинг», имеют крайне малые размеры, и, как следствие, практически незаметны для гидроакустических систем обнаружения (рисунок 15). Имея при этом низкую себестоимость производства, эти аппараты могут найти самое широкое применение в задачах мониторинга арктического региона.

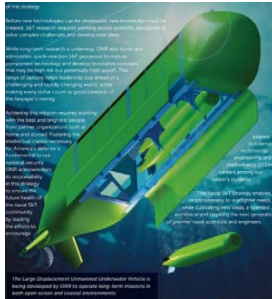


Рисунок 14 – Большой автономный подводный дрон, разрабатываемый Центром военно-морских исследований США для выполнения продолжительных операций как в условиях глубокого океана, так и на шельфе [4]



Рисунок 15 – Образцы малых автономных подводных аппаратов компании Риптайд (Micro-UUV, RipTide), разработанных для военно-морских сил США [7]

По-видимому, наиболее масштабные научно-исследовательские работы американских ученых в Арктике уже несколько лет проводятся вблизи берегов Аляски в море Бофорта [8]. В проекте задействованы современные устройства сбора гидрофизической и метеорологической информации, позволяющие осуществлять круглогодичный мониторинг состояния параметров исследуемого региона. Размеры развернутой интегрированной системы наблюдений составляют более 400 км. Используются как вмораживаемые в лед системы наблюдений, так и автономные подводные аппараты, а также дрейфующие буи. Для навигации подводных аппаратов используется акустическая система связи.

На рисунке 16 приводится схематическое изображение расположения основных

элементов системы наблюдений, развернутой вблизи побережья Аляски для проведения круглогодичных научно-технических работ, а также увеличенное схематическое изображение одного составного элемента единой арктической системы наблюдений США. Этот элемент образован пятью буями для измерения параметров ледового покрова и поверхностного волнения (IMB/WaveBuoy), расположенными в углах и в центре условного прямоугольника, а также расположенными внутри этого прямоугольника вертикальным профилографом (ITP), системой для измерения потоков (AOFB) и автономной метеорологической станцией (AWS). Вблизи кромки льда изображены свободно дрейфующие, автономно передвигающиеся, а также заякоренные системы наблюдений.

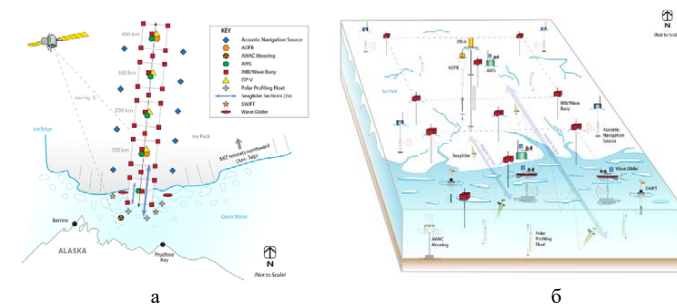


Рисунок 16 – Расположение основных элементов системы наблюдений вблизи Аляски (а) и увеличенное схематическое изображение элемента единой арктической системы наблюдений США (б)

Основным заказчиком и фактически конечным потребителем большинства научно-технических исследований, проводимых американскими учеными в Арктике, является Департамент 32 Центра военно-морских исследований США, занимающийся исследованиями океана как театра военных действий (Ocean Battlespace Sensing). Основной целью деятельности этого департамента является [8] использование научных и технологических разработок в области океанографии и метеорологии для организации наблюдений, моделирования и прогнозирования состояния океана как театра военных действий, а также непосредственно для обнаружения подводных лодок и их классификации, для обнаружения и нейтрализации мин как в океане, так и в прибрежной зоне. Информация, необходимая для решения этих прикладных задач, поступает непосредственно в ходе проведения научно-исследовательских работ.

Вопросам Арктики посвящена отдельная программа «Арктическое и глобальное прогнозирование» (Arctic and Global Prediction Program), реализуемая Департаментом 32. Основные области деятельности в рамках этой программы:

- фундаментальные и прикладные исследования, направленные на улучшение понимания физической природы ключевых процессов, происходящих в Арктике;

- разработка новых технологий, основанных на использовании датчиков нового поколения, платформ, методов навигации и приема/передачи информации, обеспечивающих возможности устойчивого наблюдения в сложных условиях Арктики;

- разработка интегрированной модели «океан – ледовый покров – волновые процессы – атмосфера» для улучшенного прогнозирования арктических условий для различных временных и пространственных масштабов.

Годовые отчеты по программе «Арктическое и глобальное прогнозирование» представлены на сайте Департамента 32 [4].

Проводятся также работы по новому масштабному проекту «Арктические и глобальные системы наблюдений/научные наблюдения» (Arctic Mobile Observing System/Science, AMOS), который направлен не столько на научно-исследовательские работы, сколько на опытно-конструкторские разработки. Исследования, которые будут финансироваться в рамках этой программы, направлены на разработку новых сенсоров, измерительных платформ и технологий для автономных мобильных наблюдений в арктическом регионе. Особый акцент сделан на разработке мобильных информационно-измерительных

стем, которые могут как дрейфовать с ледовым покровом, так и независимо перемещаться, при этом автономно вести сбор и передачу информации.

Общей целью является разработка и создание нового поколения методов мобильных автономных исследований Арктики, позволяющих осуществлять мониторинг основных параметров этого региона для прогнозирования динамики происходящих процессов. Среди основных целей этой программы можно выделить следующие:

- разработка новых сенсоров и систем наблюдений для реализации мониторинга в Арктике;
- модификация существующих решений для применения в арктических условиях;
- использование мобильных автономных решений, приемлемых для арктического региона;
- новые методы зондирования среды, основанные на совместном применении различных датчиков и измерительных платформ;
- малопотребляющие системы для выполнения долговременных операций;
- использование подледных систем навигации и связи.

### ВЫВОДЫ

Процессы, происходящие в настоящее время в Арктике, ставят ряд новых фундаментальных задач, решение которых требуется для адекватного описания и прогнозирования этих изменений. Одной из таких задач является разработка новых методов теоретического и экспериментального исследования геогидроакустических волновых процессов в слоистой гидрофизической среде, которая сейчас формируется в Арктике. Одной из ключевых особенностей этой среды следует считать наличие «прерывистого» ледового покрова, являющегося переходным состоянием между свободной поверхностью океана и сплошным ледовым покровом. Это не соответствует ни случаю свободной поверхности океана, ни наличию сплошного ледового покрова – двум крайним случаям, подробно рассмотренным в классических теориях. При сохранении текущей тенденций сокращения площади многолетних льдов в ближайшее время наличие именно «прерывистого» ледового покрова будет определять особенности распространения акустических волн в арктическом регионе значительную часть года. Теоретические основы, позволяющие описать эти особенности, в настоящее время только начали разрабатываться.

### ЛИТЕРАТУРА

1. [http://iabp.apl.washington.edu/maps\\_daily\\_map.html](http://iabp.apl.washington.edu/maps_daily_map.html)
2. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Агафонов В.М., Собисевич Л.Е. Вмораживаемый автономный геоакустический буй нового поколения // Наука и технологические разработки. – Т. 97, № 1. – С. 25-34.
3. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С. Исследование геогидроакустических полей – физическая основа мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов в Арктике // Известия РАН. Серия физическая. – Т. 82, № 5. – С. 565-571.
4. <http://www.onr.navy.mil>
5. <http://dx.doi.org/10.14430/arctic4449>
6. <http://www.boeing.com>
7. <https://riptideas.com>
8. <http://www.apl.washington.edu>

УДК 530.343, 534.11

д.ф.-м.н. О.В. РУДЕНКО

### НЕКОТОРЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОЙ АКУСТИКИ

Статья обращает внимание на необходимость фундаментальных исследований на примере ряда характерных примеров нелинейных эффектов в различных областях науки и техники. Изложены основные принципы подхода к решению и исследованию этих эффектов, составляющих специальные разделы нелинейной акустики.

### ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальные направления науки – это такие направления, которые расширяют область наших знаний, обладают новизной, но при этом не обязательно обещают скорый «выход» в практику.

Известно, что наука едина, но внутри нее целесообразно выделять фундаментальную, прикладную и техническую (инженерную) составляющие. Если этого не делать, возникают неясности, кто (бюджет, крупный или малый бизнес) и что именно должен финансировать. В последние годы бюджет экономят, требуя вложений от бизнеса. Это значит, что фундаментальный сектор будет сокращаться, а роль технических работ, обещающих быструю отдачу, – расти. Эта тенденция наблюдается даже по Нобелевским премиям последних лет. Но наиболее интересные прикладные работы содержат коммерчески значимые сведения, которые часто скрывают от конкурентов. Тенденция превращения новых знаний в товар, кажется, не согласуется с альтруистическими принципами научного творчества.

Естественно, изменяется и облик нелинейной акустики. Если сравнить доклады на международных симпозиумах по нелинейной акустике 1960-1970-х годов и последних лет, это станет очевидным. Заметная часть коллег перешла от изучения явлений и генерации перспективных идей к добыванию средств на прикладные исследова-

ния и отсылке информации в «высокорейтинговые» зарубежные журналы. На изменение научного уровня влияют преувеличение роли компьютеризации, появление большой группы начинающих ученых из азиатских стран, деградация массового образования и взрывной рост хаотической, «мусорной» информации, которая как бы экранирует действительно ценную информацию и стимулирует невольное нарушение норм научной этики.

Нелинейная акустика, как и акустика в целом – это междисциплинарная область, сегодня в основном прикладная. Но некоторые направления в ней могут содержать признаки фундаментальной науки.

Во-первых, это работы специалистов-акустиков, имеющие равную ценность как для нелинейной акустики, так и для двух фундаментальных областей – математической физики и теории нелинейных волн. В этих направлениях хорошо присуждаются гранты, открываются исследовательские программы, люди активно цитируют друг друга. Однако нелинейная акустика здесь не считается лидером, а заметные результаты по традиции относят не к акустике, а к другим разделам физики и математики.

Во-вторых, это изучение акустических явлений специалистами-неакустикоматиками из фундаментальных (по определению) разделов физики – космологии, физики ядра и частиц, физики конденсированного состояния.



Примеры – формирование структуры Вселенной после Большого взрыва под действием акустических волн; образование ячеистых скоплений звездного вещества; деление ядер в каплевой модели; волны, рождающиеся внутри звезд и при столкновениях астрофизических объектов; акустические метаматериалы и микрофлюидика; взаимодействия фононов с квазичастицами другой природы; квантовые макроскопические эффекты.

Важными примерами прикладных исследований, требующих серьезного фундаментального задела, можно считать работы в области геофизической нелинейной акустики, включая сильные волны в атмосфере и океане, а также в Земле, где предвестники катастроф и сами события несут выраженный нелинейный характер. Очень важны работы по интенсивному ультразвуку в медицине (диагностика, терапия), биологии и медицинском приборостроении. Широкие перспективы открывает развитие нелинейных методов акустической диагностики изделий в материаловедении, промышленности и строительной индустрии. Сегодня реанимируются усилия по созданию сверхзвуковых пассажирских самолетов, препятствием для эксплуатации которых ранее была не только низкая экономичность, но и экологические последствия звукового удара.

Разумеется, ведутся работы, направленные на специальные приложения эффектов нелинейной акустики, которые проявляются в полях большой интенсивности.

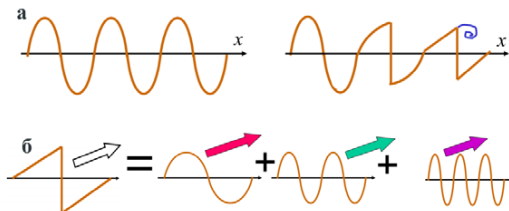


Рисунок 1 – Сравнение профилей линейной (форма неизменна) и нелинейной волны (форма искажается) (а); оптическая аналогия, поясняющая сложный гармонический состав пилообразной волны (б)

### ПРОСТЕЙШИЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Напомним, какие волны принято называть нелинейными. Это сильные волны с интенсивностью (амплитудой) достаточно большой для того, чтобы в них наблюдались нелинейные явления. Примеры: генерация частотных компонент, отсутствующих в спектре исходного сигнала; искажение формы волны при ее распространении; взаимодействие волн различных частот. Проявления нелинейных эффектов обычно усиливаются с ростом интенсивности (амплитуды) волны. Это лишь простейшие явления; известно много других, более сложных.

Как показано на рисунке 1а, слабая (линейная) волна сохраняет свою форму при распространении, а профиль сильной (нелинейной) волны искажается – становится все более крутым, как морская волна, набегаящая на берег. В отличие от волны на поверхности моря, в акустической волне завихрения на гребне не образуются. Вместо этого появляются фронты, представляющие собой слабые ударные волны. Исходная гармоническая волна превращается в периодическую пилообразную волну. Спектр этой волны состоит из многих высших гармоник (рисунок 1б) – первой, второй, третьей и т. д. Привлекая для наглядности аналогию с оптикой, можно сопоставить пилообразной волне белый цвет, а составляющим ее гармоникам – цвета, длина волны которых уменьшается с ростом номера гармоники.

Уравнения нелинейной акустики часто упрощают, используя движущуюся со скоростью звука систему координат, сопровождающую волну. Неподвижный наблюдатель (снеговик на рисунке 2) видит сложную картину – волна быстро пронесется мимо, дополнительно искажаясь.

Наблюдатель, сидящий на гребне волны (лыжник), видит упрощенную картину – только медленные процессы искажения профиля. Переход в движущуюся систему координат достигается введением «запаздывающего» времени  $\tau = t - x/c_0$ .

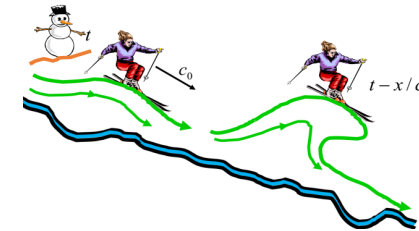


Рисунок 2 – Идея упрощения уравнений нелинейной акустики переходом к «запаздывающему» времени

Запишем нелинейное волновое уравнение в обычных координатах:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta p = \tilde{L}(p^2) \quad (1)$$

Здесь в правой части через  $\tilde{L}(p^2)$  (линейный оператор  $\tilde{L}$ , действующий на квадрат акустического давления) символически обозначена группа нелинейных членов. Пусть  $p_1, p_2$  – два точных решения уравнения (1). Легко видеть, что их линейная комбинация  $p = C_1 p_1 + C_2 p_2$  уже не будет точным решением, поскольку появится «лишний» член – правая часть уравнения (2):

$$\left( C_1 \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} - c_0^2 C_1 \Delta p_1 - \tilde{L}(p_1^2) \right) + \left( C_2 \frac{\partial^2 p_2}{\partial t^2} - c_0^2 C_2 \Delta p_2 - \tilde{L}(p_2^2) \right) = 2C_1 C_2 \tilde{L}(p_1 p_2) \quad (2)$$

Левая часть уравнения (2) равна нулю, правая – не ноль, то есть (2) не является тождеством. Иными словами, принцип линейной суперпозиции решений в нелинейных задачах нарушается. Для волновых задач это означает, что сильные волны начинают взаимодействовать между собой.

Нелинейные взаимодействия легко иллюстрировать, решая нелинейное уравнение (1) методом последовательных приближений. Конкретизируем нелинейный член в (1):

$$\tilde{L}(p^2) = \frac{\varepsilon}{c_0^3 \rho_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p^2. \quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon$  – нелинейный параметр,  $\rho_0$  – плотность среды. Переходя к сопровождающей системе координат, для волны, бегущей вдоль направления  $x$ , получим уравнение Хопфа:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\varepsilon}{c_0^3 \rho_0} p \frac{\partial p}{\partial \tau}. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет точное решение, однако для наглядности считаем нелинейный член малым и выпишем уравнения для первых трех приближений  $p = p^{(1)} + p^{(2)} + p^{(3)} + \dots + p^{(n)}$ ,  $p^{(n)} \ll p^{(n+1)}$ :

$$\frac{\partial p^{(1)}}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p^{(2)}}{\partial x} = \frac{\varepsilon}{2c_0^3 \rho_0} \frac{\partial}{\partial \tau} p^{(1)2},$$

$$\frac{\partial p^{(3)}}{\partial x} = \frac{\varepsilon}{2c_0^3 \rho_0} \frac{\partial}{\partial \tau} 2p^{(1)} p^{(2)} \quad (5)$$

Система (5) – это цепочка линейных уравнений, связанных посредством нелинейного члена. Их решения для гармонического исходного сигнала:

$$p^{(1)} = P_0 \sin \omega \tau, \quad p^{(2)} = \frac{\varepsilon \omega P_0^2}{2c_0^3 \rho_0} x \sin 2\omega \tau,$$

$$p^{(3)} = \frac{\varepsilon^2 \omega^2 P_0^3}{8(c_0^3 \rho_0)^2} x^2 (3 \sin 3\omega \tau - \sin \omega \tau) \quad (6)$$

На рисунке 3 показано, что волну в соответствии с (6) можно рассматривать как поток фононов. В первом приближении существуют лишь фононы с исходной частотой  $\omega$ . Во втором приближении фононы попарно сливаются, и наряду с исходными возникают фононы удвоенной частоты  $2\omega$ . В третьем приближении идут процессы  $(2\omega + \omega)$  и  $(2\omega - \omega)$ , в результате которых генерируются как третья гармоника, так и нелинейная добавка к волне основной частоты.



Рисунок 3 – Генерация гармоник как каскад слияния фононов

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ**

В этом разделе даются конкретные примеры результатов, которые получены в различных разделах физики и которые можно отнести к нелинейной акустике.

Начнем с приложений к космологии. На рисунке 4а изображена ячеистая

структура, образованная ударными фронтами; фронты – это места скопления межзвездного вещества.

Сегодня принято считать, что сильные акустические волны были ответственны за формирование структуры Вселенной после Большого взрыва (рисунок 4б).

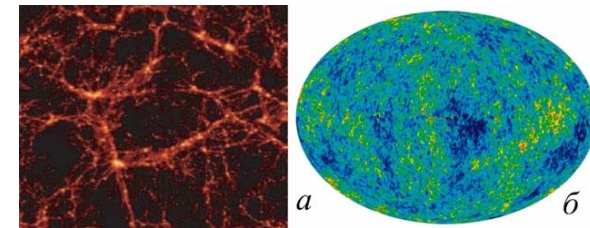


Рисунок 4 – Примеры смежных задач нелинейных задач космологии

Диапазон масштабов, в которых существуют акустические волны, огромен. Наряду с галактическими масштабами объекты нелинейной акустики существуют в микромире. Например, масштаб  $10^{-15}$  м соответствует акустическим колебаниям атомных ядер, описываемых в рамках капельной модели. На рисунке 5а показаны

моды колебаний сферической капли при слабом возбуждении. Такие моды изучены еще Рэлеем. Сильно нелинейные акустические колебания жидко-капельного ядра, возбуждаемые попаданием нейтрона, ведут к делению ядра, размножению нейтронов и цепной реакции – ядерному взрыву (рисунок 5б).

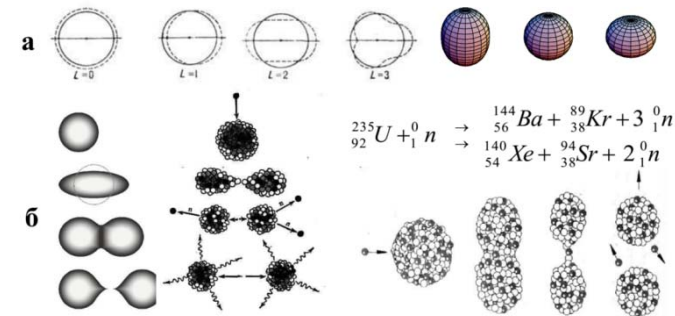


Рисунок 5 – Слабые (а) и сильные (б) акустические колебания жидкой капли

В сверхтекучих жидкостях также изучаются нелинейные волны. Использование математических модели нелинейной акустики обнаруживает аналогичное поведение температурных волн (второй звук). Однако, судя по цитированию, в этой области с работами акустиков знакомы недостаточно. На рисунке 6а изображена зави-

симость коэффициента нелинейности второго звука от температуры. На рисунке 6б показаны нелинейно искаженные профили импульсного сигнала исходной прямоугольной формы, наблюдавшиеся при различных температурах на фиксированном расстоянии от источника. Кривые 1-8 измерены при температурах от 2.1 до 1.6 К.

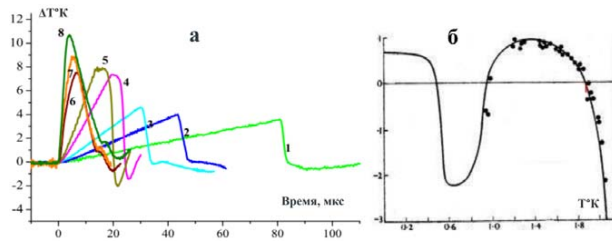


Рисунок 6 – Профили искаженных температурных волн (а) и нелинейный параметр жидкого гелия (б)

Особое место нелинейная акустика занимает в физике твердого тела. Знаменитую работу Ландау и Румера (1937 г.), посвященную затуханию звука из-за нелинейного взаимодействия когерентных фононов (акустическая волна) с тепловыми фононами (акустический шум), на наш взгляд, вполне можно отнести к пионерским работам в области нелинейной акустики твердых тел. Конечно, физики-теоретики вряд ли с этим согласятся.

Другой пример относится к нелинейной акустической диагностике, интенсивно развивающейся в последние годы. Известно, что на краях трещины приложенное к образцу механическое напряжение усиливается во много раз. Картина напряжений в

окрестности трещины изображена на рисунке 7а. Именно концентрация напряжений приводит к росту трещин и разрушению образца. Однако даже вдали от порога разрушения трещина проявляет нелинейные свойства, благодаря которым она может быть обнаружена.

На рисунке 7б изображена картина смещений при колебаниях диска, возбуждаемых на частоте основной моды. Проявление трещины не наблюдается. Однако из-за больших напряжений в окрестности вершин они начинают колебаться на удвоенной частоте. Справа на рисунке 7б отчетливо виден локальный пик смещения при регистрации распределения на частоте второй гармоники.

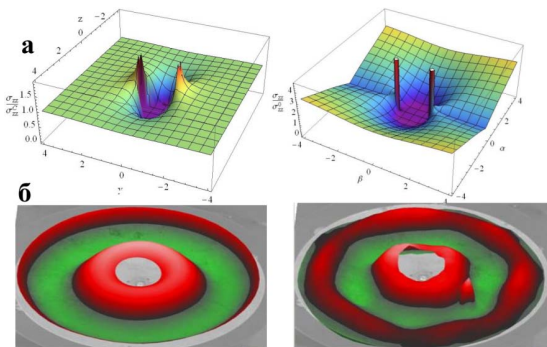


Рисунок 7 – Концентрация напряжений в вершинах трещин (а) и обнаружение трещины при регистрации колебаний на частоте второй гармоники (б)

Известным приложением нелинейной акустики к гидроакустике является параметрический излучатель звука. Его работа основана на генерации волны низкой разностной частоты  $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ , которая рождается в воде и, в отличие от излучаемых в воду высокочастотных волн накачки  $\omega_1, \omega_2$ , затухает слабо и может распространяться на большие расстояния. Еще несколько полезных свойств параметрического излучения:

- высокая направленность благодаря большому волновому размеру области локализации нелинейных источников (где сосредоточены высокочастотные волны

- накачки) и узкой характеристике направленности высокочастотных волн;
- малый уровень боковых лепестков;
- возможность перестройки разностной частоты  $\Omega$  в широких пределах;
- способность сохранять гладкий фронт в сильно неоднородных средах (например, в осадках) благодаря компенсации фазовых искажений высокочастотных волн накачки.

Взаимодействующие поля описываются обычно базовым для нелинейной акустики уравнением Хохлова – Заболотской – Кузнецова (ХЗК), изображенным на рисунке 8 с некоторыми его применениями.



Рисунок 8 – Уравнение ХЗК, описывающее параметрический гидролокатор, и некоторые приложения

Проявления нелинейности в атмосфере весьма разнообразны. Это взрывы, гром, волны техногенного происхождения. В последнее время наблюдается новая волна интереса к звуковому удару (ЗУ), образуемому при сверхзвуковом движении тел. Этот интерес связан с перспективами создания сверхзвуковых пассажирских самолетов (СПС) нового поколения. На основании предыдущего опыта («Конкорд» и «ТУ-144») стало ясно, что препятствием для их коммерческой эксплуатации являются две причины: низкая экономическая

эффективность и звуковой удар, оказывающий вредное влияние на живые организмы, сооружения и технику.

Как показано на рисунке 9, вблизи СПС волна имеет сложную форму, а давления достигают тысяч Па. По мере распространения детали профиля волны сглаживаются. Слабые ударные волны сталкиваются и слипаются друг с другом как неупругие частицы. В результате многократных слияний образуется волна универсальной N-образной формы, содержащая головную и хвостовую ударные волны.



Рисунок 9 – Формирование звукового удара и N-волны по мере распространения волны от СПС к поверхности земли

Считается, что расчет звукового удара – это задача аэродинамики и теории ударных волн. Это не совсем так. Из данных на рисунке 9 видно, что акустические числа Маха очень малы (давление в волне мало по сравнению с атмосферным), то есть уже на расстоянии 1-2 калибров от СПС можно пользоваться моделями нелинейной акустики. Кроме того, при распространении нелинейная волна взаимодействует с неоднородностями стандартной слоистой атмосферы, случайными вихревыми образованиями, проходит через фокальные области и каустики. Эти процессы имеют ясные частотно-избирательные свойства и требуют анализа акустическими (радиофизическими) методами. Например, вблизи поверхности волна проходит через турбулентный пограничный слой атмосферы, формирующий фокусирующие и дефокусирующие лучевые трубки (рисунок 9). Появляются случайные выбросы амплитуды и пики в профиле N-волны, представляющие повышенную опасность.

Еще одной важной областью приложений нелинейной акустики является использование ее методов и соответствующих приборов в медицинской диагностике и терапии. Наиболее яркие и широко известные результаты:

- массовый выпуск литотриптеров – генераторов акустических ударных волн для разрушения биоконкрементов (почечных камней);

- массовое недавнее появление в клиниках эластографов – приборов для диагностики опухолей путем возбуждения сдвиговых волн радиационным давлением модулированного фокусированного ультразвука;

- оснащение стандартных сонографов (УЗИ) режимами визуализации на высших гармониках и многое другое.

Малозвестными до сих пор остаются работы Бурова начала 1950-х гг., в которых он добился ультразвуковой стимуляции иммунитета, приводящего к исчезновению удаленных метастазов при УЗ-облучении материнской раковой опухоли (совместно с Блохиным). Это были одни из первых в мире работ по ультразвуку в медицине, которые дали мощный толчок развитию всей нелинейной акустики в СССР. Они были выполнены в лаборатории анизотропных структур РАН.

Обратим также внимание на формирующееся направление исследований сильно нелинейных волн. Даже опытные ученые не всегда подчеркивают разницу между двумя объектами: волной с сильно выраженной слабой нелинейностью и сильно нелинейной волной.

В чем различие между ними? Преобладают слабо нелинейные волны, для которых уравнения состояния могут быть разложены в степенные или функциональные ряды. Пример – разложение адиабаты по степеням возмущений плотности и давления в окрестности равновесного состояния:

$$p = p_0 + p' = p_0 \left( \frac{\rho_0 + \rho'}{\rho_0} \right)^\gamma = p_0 + c_0^2 \rho_0 \times \left[ \frac{\rho'}{\rho_0} + \frac{\gamma-1}{2} \left( \frac{\rho'}{\rho_0} \right)^2 + \frac{(\gamma-1)(\gamma-2)}{6} \left( \frac{\rho'}{\rho_0} \right)^3 + \dots \right]$$

Малые квадратично- и кубично-нелинейные члены этого разложения приводят к обычным для нелинейной акустики эффектам генерации гармоник, формированию ударных фронтов, самовоздействию. Эти эффекты могут быть сильно выражены: например, форма пилообразной волны сильно отличается от исходной гармонической формы. Но это сильное искажение достигается на больших расстояниях в результате накопления слабых искажений по мере распространения волны.

Напротив, сильно нелинейные эффекты могут проявиться на очень малых расстояниях от источника. Они описываются уравнениями, не следующими из разложений в ряд. Однако такие разложения нельзя использовать по крайней мере в трех случаях:

- когда функциональные связи между параметрами содержат особенности. Примеры – «хлопающая» и герцевская нелинейности в акустике структурно-неоднородных сред, а также нелинейность механических виброударных систем;

- когда эти разложения расходятся в очень сильных полях, достигаемых, например, при взрывах; обычно такие поля с напряжением порядка модуля упругости необратимо изменяют свойства среды;

- когда в разложениях отсутствует линейный член, зато доминирует одна из высших нелинейностей.

В таких системах может наблюдаться саморасщепление или самоотражение волн, заключающееся в том, что достаточно сильная волна не может бежать в одном направлении. После образования ударных фронтов от нее отщепляется волна, бегущая в обратную сторону.

Другое явление – остановка бегущей волны, наступающая в тех случаях, когда ее интенсивность превышает некоторое пороговое значение. Возможно самовоздействие, приводящее к образованию сингулярности типа черной дыры, которая начинает притягивать и поглощать окружающие слабые возмущения.

Эти и другие похожие явления, видимо, будут предметом исследований в недалеком будущем.

## ВЫВОДЫ

Из приведенных примеров, касающихся только одного небольшого раздела физики – нелинейной акустики, видно, что понимание и развитие рассмотренных эффектов и практически всех приложений этой области науки невозможно без освоения и разработки ее фундаментальных основ. Причем этот вывод справедлив для всех направлений научно-технической деятельности. Без создания фундаментального задела нельзя надеяться на серьезные успехи в дальнейшем развитии любого направления науки и техники. Хотелось бы, чтобы эту истину помнили все руководители и специалисты, от которых зависит финансирование научно-исследовательских работ и которым не безразличны роль и статус России как одной из ведущих и развитых в научно-техническом направлении держав.



д.ф.-м.н. А.В. РАЗИН, д.ф.-м.н. А.Л. СОБИСЕВИЧ,  
д.т.н. Л.Е. СОБИСЕВИЧ

### СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

В статье приведены результаты анализа наиболее характерных акустических процессов, протекающих в слоистых структурах морской среды. Значительный интерес представляет совместное рассмотрение волновых процессов, происходящих в морской среде с учетом ее взаимодействия с атмосферой и дном моря. Эти процессы формируют помеховую обстановку и являются источниками полезной информации. Рассмотрены вопросы возможности обнаружения летательных аппаратов из-под воды, а также дальнего обнаружения ПЛ при регистрации «квазиоперечных» волн с использованием векторных приемников как в воде, так и в скважинах на суше.

#### ВВЕДЕНИЕ

Анализ наведенных волновых процессов при создании нового поколения подводных информационно-измерительных систем связан с непрерывной оценкой помеховой обстановки в районе их практического использования. При этом необходимо понимать, что сейсмоакустические волновые возмущения в системе «Земля – океан – атмосфера» могут возбуждаться при различных процессах естественного или антропогенного характера [1].

Практика экспериментальных работ, связанная с изучением помеховой обстановки на морских театрах, убеждает в том, что весь комплекс задач по обеспечению помехоустойчивости геоакустических информационно-измерительных систем нового поколения сегодня представляет собой крупную проблему, которая должна быть разрешена в ближайшие годы. Проблема эта сложная и многоплановая как в теоретических построениях, так и в экспериментальных подходах к решению определяющих задач.

Целый ряд теоретических задач, определяющих структуру геоакустических полей, генерируемых в условиях мелкого и

глубокого морей с учетом наличия ледового покрова, изучен недостаточно полно. В частности, не решены задачи, связанные с расчетами полей и энергетических характеристик сейсмоакустических волн, создаваемых поверхностными и подповерхностными источниками различной физической природы. Не изучены в достаточной мере инфразвуковые и псевдволновые поля в слоистых структурах типа «морское дно – водный слой – поверхность моря», генерируемые ветровыми потоками, колебаниями морского дна и движением в воде протяженных подводных объектов.

В многочисленных работах, посвященных возбуждению и распространению упругих волн в однородном твердом полупространстве, рассматриваются поверхностные и подповерхностные источники вполне определенной формы [2-6].

В данной статье анализируется фундаментальная задача – возбуждение упругих волн в твердом полупространстве и прилегающим слое флюида некоторой заданной системой сил. Такая задача является составной частью указанной фундаментальной проблемы. В дальнейших работах мы рас-

ширим решение на структуры, которые будут отражать реальную обстановку на море.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Итак, пусть плоскость  $z=0$  декартовой системы координат совпадает с границей раздела среды, имеющей плотность  $\rho_1$ , скорость звука  $c_1$  и заполняющей полупространство  $z < 0$ , и однородного изотропного твердого тела, занимающего полупространство  $z > 0$  и характеризуемого плотностью  $\rho_2$  и скоростями продольной  $c_l$  и поперечной  $c_t$  волн. На единицу площади плоскости  $z=h$  действует сила  $\mathbf{f}(x, y, z)$ , где  $t$  – время (рисунок 1).

Смещения в упругой среде описываются однородным уравнением Ламэ. При этом силовые источники переводятся в гра-

ничные условия для тензора напряжений, записанные на плоскости действия силы. На этой плоскости также выполняются условия равенства всех компонент вектора смещений (условие отсутствия разрывов в среде). Развивая решение на примере твердого деформируемого тела, каким мы можем считать морское дно, следует ввести потенциалы  $\psi_3$  и  $\mathbf{A}_3$ . Они описывают волны, уходящие от силового источника на бесконечность вглубь упругого полупространства (область III,  $z > h$ ). Кроме того, следует использовать потенциалы  $\psi_2$  и  $\mathbf{A}_2$ , описывающие волны, распространяющиеся в области II, заключенной между границей раздела жидкой и твердой сред и плоскостью, на которой расположены источники ( $0 < z < h$ ).

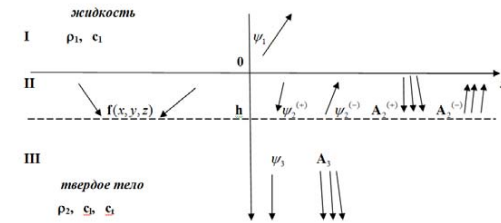


Рисунок 1 – К постановке задачи

Поскольку в области II есть волны, распространяющиеся как в положительном, так и в отрицательном направлении оси  $z$ , потенциалы при  $0 < z < h$  представим в виде:

$$\psi_2 = \psi_2^{(+)} + \psi_2^{(-)}, \quad \psi_3 = \psi_3^{(+)} + \psi_3^{(-)},$$

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_2^{(+)} + \mathbf{A}_2^{(-)},$$

где верхний индекс «(+)» означает, что волна распространяется в сторону возрастающих значений  $z$  (вниз на рисунке 1), а индекс

«(-)» означает, что волна распространяется в сторону убывающих значений  $z$  (вверх на рисунке 1).

Смещения  $u_{2,3}$  определяются выражениями:  $\mathbf{u}_1 = \text{grad} \psi_1$ ,  $\mathbf{u}_{2,3} = \text{grad} \psi_{2,3} + \text{rot} \mathbf{A}_{2,3}$ ,

$p = -\rho_1 \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2}$ ,  $\text{div} \mathbf{A}_{2,3} = 0$ . Поля в областях I – III описываются неизвестными

величинами:  $\psi_1$ ,  $\psi_2^{(+)}$ ,  $\mathbf{A}_2^{(+)}$ ,  $\psi_2^{(-)}$ ,  $\mathbf{A}_2^{(-)}$ ,  $\psi_3$  и  $\mathbf{A}_3$ . Для фурье-образов этих величин из граничных условий получаются десять алгебраических уравнений. Еще три уравнения получаются из стандартных условий равенства нулю дивергенции векторных потенциалов  $\mathbf{A}_2^{(+)}$ ,  $\mathbf{A}_2^{(-)}$ ,  $\mathbf{A}_3$ . Эти уравнения удобно использовать для исключения из граничных условий  $z$ -компонент векторных потенциалов. Это позволяет получить для фурье-образов

$$\psi_1(x, y, z, t) = \frac{1}{\rho_2 c_t^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \left[ (k_i^2 - 2k^2) e^{i\kappa_i h} - 2\kappa_i \kappa_i e^{i\kappa_i h} \right] (kF) - \kappa_i \left[ (k_i^2 - 2k^2) e^{i\kappa_i h} + 2\kappa^2 e^{i\kappa_i h} \right] F_z \times \times \frac{1}{\kappa_i S_0(k)} e^{-i\omega t + i(kx - \kappa_i z)} d\omega d\mathbf{k}, \quad (1)$$

где  $S_0(k) = R_0(k) + \varepsilon \kappa_i^4 \kappa_i / \kappa_i$ ,  $R_0(k) = (k_i^2 - 2k^2)^2 + 4k^2 \kappa_i \kappa_i$ ,  $\kappa_{1,t} = (k_{1,t}^2 - k^2)^{1/2}$ ,  $\varepsilon = \rho_1 / \rho_2$ ,  $k_{1,t} = \omega / c_{1,t}$ ,  $\mathbf{F}(k_x, k_y, \omega)$  – спектр силового источника.

Интегралы Фурье имеют полюс, определяемый из решения уравнения  $S_0(k) = 0$ , который связан с излучением поверхностных волн на границе раздела «жидкость – твердое тело». При условии  $c_1 < c_R$ , где  $c_R$  – скорость рэлеевской волны на границе твердое «тело – вакуум» (соответствующее ей волновое число  $k_R$  определяется из уравнения Рэлея  $R_0(k) = 0$ ), уравнение  $S_0(k) = 0$  имеет один действительный корень  $k_S$ , соответствующий поверхностной волне Стоунли (Стонели) [7, 8].

Анализ полученного интегрального решения задачи позволяет сделать ряд общих выводов о возбуждении тех или иных типов волн источниками различных конфигураций. Если вертикальная составляющая силы отсутствует, а распределение горизон-

тальных сил представляет собой соленоидальное поле (дивергенция вектора силы равна нулю), то такой источник возбуждает только поперечные волны, вектор смещений в которых лежит в горизонтальной плоскости (SH-волн). Акустические волны в жидкости, продольные волны в твердом теле, а также поверхностная волна Стоунли в этом случае не возбуждаются.

Если сила имеет вертикальную составляющую, или в ее отсутствие и ротор, и дивергенция поля горизонтальных сил отличны от нуля, то генерируются акустические волны в жидкости, продольные и поперечные (SV- и SH-поляризации) волны в твердом теле, а также поверхностная волна Стоунли.

Для получения физических выводов, которые могут иметь практическое значение, необходимо от общих выражений перейти к рассмотрению конкретных моделей источников сейсмоакустических волн. Часто значительный интерес представляет рассмотрение волн низкой частоты, поскольку именно такие волны могут эффективно распространяться на значительные расстояния. Для волн низкой частоты характерные размеры источника могут быть значительно меньше длины волны. В этом случае удобной идеализацией является точечный излучатель. Из общего решения, записанного для произвольных распределений, зависящих от времени сил, были получены выражения для полей сейсмоакустических волн, возбуждаемых точечными гармоническими силовыми источниками, действующими на глубине  $z = h$  под поверхностью твердого тела. Рассмотрены случаи вертикальной и горизонтальной сил. В случае вертикальной ориентации источника (вдоль нормали к границе раздела сред) результаты соответствуют известному решению осесимметричной задачи [9]. При горизонтальной ориентации источника (сила действует параллельно границе) цилиндрическая симметрия отсутствует, что значительно усложняет структуру решения. Для случая горизонтальной силы, ориентированной вдоль оси  $x$ , распределение сил по плоскости  $z = h$  имеет вид:

$$\mathbf{f} = f_0 \delta(x) \delta(y) e^{-i\omega t} \mathbf{e}_x, \quad (2)$$

где  $f_0$  – амплитуда приложенной силы,  $\omega$  – частота,  $\mathbf{e}_x$  – орт оси  $x$  и  $\delta$  – дельта-функция Дирака. Для случая вертикально ориентиро-

$$\zeta_x(h) = \left[ (2\xi^2 - 1) \exp(-k_i h \sqrt{\xi^2 - n^2}) - 2\sqrt{\xi^2 - n^2} \sqrt{\xi^2 - 1} \exp(-k_i h \sqrt{\xi^2 - 1}) \right]^2 \quad (6)$$

и

$$\zeta_z(h) = \left[ (2\xi^2 - 1) \exp(-k_i h \sqrt{\xi^2 - n^2}) - 2\xi^2 \exp(-k_i h \sqrt{\xi^2 - 1}) \right]^2 \quad (7)$$

– функции, описывающие зависимости мощности излучения волны Стоунли от глубины расположения источника,  $\xi = k_S / k_i$ ,  $n = c_t / c_l$ ,  $k_S$  – волновое число волны Стоунли.

ванного силового источника в формуле (2) следует заменить орт  $\mathbf{e}_x$  оси  $x$  на орт  $\mathbf{e}_z$  оси  $z$ .

Интегральные выражения для потенциалов смещений, описывающие волновые поля в дне и в жидкости, а также результаты даже приближенных вычислений этих интегралов довольно громоздки. Однако для мощности излучения поверхностной волны Стоунли, возбуждаемой точечными силовыми гармоническими источниками, удается получить простые формулы. Эти формулы получены методом реакции излучения и описывают суммарную мощность волны Стоунли в обеих средах. Для точечных гармонических источников имеем:

$$W_S^{(x,z)}(h) = W_S^{(x,z)}(0) \zeta_{x,z}(h). \quad (3)$$

Здесь индекс « $x$ » соответствует источнику горизонтальной силы, а индекс « $z$ » – источнику вертикальной силы,

$$W_S^{(x)}(0) = - \frac{f_0^2 \omega^3 k_S^3}{8\rho_2 c_t^4 \sqrt{k_S^2 - k_i^2} S_0'(k_S)}, \quad (4)$$

$$W_S^{(z)}(0) = - \frac{f_0^2 \omega^3 k_S \sqrt{k_S^2 - k_i^2}}{4\rho_2 c_t^4 S_0'(k_S)} \quad (5)$$

– мощность излучения волны Стоунли, возбуждаемой горизонтальным и вертикальным поверхностными источниками,



Формулы (5) и (7), следующие как частный случай из общего решения задачи, были ранее получены в работе [9].

Формулы (4)–(7) позволяют вычислять, например, мощность излучения поверхностной волны Стоунли на границе раздела «дно – жидкость» при произвольных параметрах сред. Численные расчеты показали, что вклад волны Стоунли в общий энергетический баланс излучения весьма мал. В ряде случаев мощность волны Стоунли на границе раздела «дно – жидкость» на несколько порядков меньше полной мощности излучения всех типов

$$\psi_1 = \frac{1}{\rho_2 c_t^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \left[ (k_t^2 - 2k^2) e^{i\kappa_t h} - 2\kappa_t \kappa_i e^{i\kappa_t h} \right] (\mathbf{kF}) - \kappa_t \left[ (k_t^2 - 2k^2) e^{i\kappa_t h} + 2k^2 e^{i\kappa_t h} \right] F_z \right\} \times \frac{1}{\kappa_1 S_0(k)} e^{i(\mathbf{kr} - \kappa_t z)} d\mathbf{k}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{F}(k_x, k_y)$  – спектр источника и  $\omega$  – его частота. Временной фактор  $e^{-i\omega t}$  опущен.

Из общего выражения (8) следует ряд известных частных случаев. Если силовой источник действует на границе раздела сред, т. е.  $h = 0$ , то (8) переходит в выражение [12]:

$$\psi_1 = \frac{1}{\rho_2 c_t^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{(k_t^2 - 2k^2 - 2\kappa_t \kappa_i) (\mathbf{kF}) - \kappa_t \kappa_i^2 F_z}{\kappa_1 S_0(k)} e^{i(\mathbf{kr} - \kappa_t z)} d\mathbf{k} \quad (9)$$

В случае точечного источника вертикальной силы, когда

$$\mathbf{f} = f_0 \delta(x) \delta(y) e^{-i\omega t} \mathbf{e}_z, \quad (10)$$

(здесь  $\mathbf{e}_z$  – орт оси  $z$ ) выражение (8) для  $\psi_1$  приводится к виду [9]:

$$\psi_1 = \frac{f_0}{2\pi \rho_2 c_t^2} \int_0^{\infty} \kappa_t \left[ \frac{(2k^2 - k_t^2) e^{i\kappa_t h} - 2k^2 e^{i\kappa_t h}}{\kappa_1 S_0(k)} \right] e^{-i\kappa_t z} J_0(kr) k dk, \quad (11)$$

где  $J_0(kr)$  – функция Бесселя нулевого порядка. При записи выражения (11) учтено, что задача имеет цилиндрическую симметрию.

Ввиду громоздкости выражения (8) остановимся более подробно на случае поверхностного источника. Интеграл (9) следует вычислять методом стационарной фазы, что приводит к следующему выражению для потенциала акустической волны в атмосфере (выражение для потенциала записано в сферических координатах  $(R, \theta, \varphi)$ ):

Основная часть излучаемой мощности в жидкости уносится объемной акустической волной. Необходимо, однако, отметить, что на границе раздела «океан – дно» доля мощности волны Стоунли может быть весьма значительной [10].

В случае гармонических источников произвольной пространственной конфигурации волновые поля представляются двойными интегралами Фурье по горизонтальным компонентам волнового вектора. Например, потенциал смещений в газе имеет вид:

$$\psi_1 = -\frac{2\pi i}{\rho_2 c_t^2 S_0(k_1 \sin \theta)} \frac{e^{ik_1 R}}{R} \times \left[ \left( k_t^2 - k_1^2 \sin^2 \theta - 2\sqrt{k_t^2 - k_1^2 \sin^2 \theta} \sqrt{k_t^2 - k_1^2 \sin^2 \theta} \right) k_1 \sin \theta F_r(\mathbf{k}_{st}) - k_t^2 \sqrt{k_t^2 - k_1^2 \sin^2 \theta} F_z(\mathbf{k}_{st}) \right]. \quad (12)$$

$$\text{Здесь: } F_r = F_x \cos \varphi + F_y \sin \varphi, \quad \mathbf{k}_{st} = (k_1 \sin \theta \cos \varphi, k_1 \sin \theta \sin \varphi)$$

В рассматриваемом случае акустическое давление  $p$  связано с потенциалом соотношением  $p = \rho_t \omega^2 \psi_1$ .

Для получения физических выводов, которые могут иметь практическое значение, целесообразно перейти к рассмотрению конкретных моделей источников сейсмоакустических волн. Нас будут интересовать волны низкой частоты, для которых удобной идеализацией является модель точечного источника. Из общего решения, записанного для произвольных распределений поверхностных гармонических сил, были получены выражения для мощностей излучения акустических волн, возбуждае-

мых точечными гармоническими источниками. Рассмотрены случаи вертикальной и горизонтальной сил. В случае вертикальной ориентации источника (вдоль нормали к границе раздела сред) результаты соответствуют известному решению осесимметричной задачи [13]. Для случая горизонтальной силы, ориентированной вдоль оси  $x$ , распределение сил в горизонтальной плоскости имеет вид (2). Для поверхностного силового источника получаются три различных выражения.

В первой области мощность излучения акустической волны дается выражением:

$$W_1^{(1)} = \frac{\rho_t \omega^6 f_0^2}{8\pi \rho_2^2 c_t^3 c_t^4} \times \int_0^{\arcsin(\frac{c_t}{c_t})} \frac{(k_t^2 - 2k_1^2 \sin^2 \theta - 2\sqrt{k_t^2 - k_1^2 \sin^2 \theta} \sqrt{k_t^2 - k_1^2 \sin^2 \theta})^2 \sin^3 \theta d\theta}{S_0^2(k_1 \sin \theta)} \quad (13)$$

Выражениями, аналогичными (13), описывается мощность излучения акустических волн в двух других областях.

Проанализировав один из фундаментальных подходов, связанных с анализом условий формирования сейсмоакустических полей, обратимся к отдельным прикладным задачам, которые будут актуальны для инженеров, и рассмотрим инфразвуковое поле в воде от точечного источника, расположенного в воздухе.

С точки зрения современных при-

кладных задач представляет интерес изучение инфразвуковых волн в воде от точечного источника в воздухе на таких частотах, когда методы анализа, основанные на приближении геометрической оптики [15], не позволяют объяснить эффекты, наблюдаемые экспериментально в реальных условиях.

Итак, пусть на границу раздела «воздух – вода» из воздуха падает сферическая монохроматическая волна (рисунок 2):

$$\varphi_{nao.} = \frac{1}{R} \exp[-ik_1 R - i\omega t],$$

где  $k_1 = \omega/c_1$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $R$  и  $c_1$  – расстояние и скорость звука в воздухе соответственно.

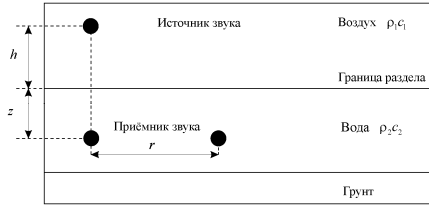


Рисунок 2 – К прохождению инфразвука из воздуха в воду на крайне низких частотах. Здесь  $r$  – горизонтальное расстояние от точки наблюдения до источника

Следуя Л.М. Бреховских, потенциал падающей волны  $\varphi_{nao.}$  можно разложить по плоским волнам в двукратный интеграл [14]. Однако для изучения крайне низкочастотных звуковых полей удобнее представить потенциал падающей волны в виде однократного интеграла Зоммерфельда (обратное интегральное преобразование Ханкеля). В этом случае:

$$\varphi_{nao.} = \frac{1}{i} \int_0^{\infty} \frac{\exp[-i\beta_1 h]}{\beta_1} J_0(kr) k dk, \quad (14)$$

где  $\beta_1 = \begin{cases} \sqrt{k_1^2 - k^2}, & k_1 > k \\ -i\sqrt{k^2 - k_1^2}, & k_1 < k \end{cases}$ . Отсюда для потенциала звукового поля в точке приема, расположенной в нижнем полупространстве, можно записать:

$$\varphi_{np.} = \frac{2}{i} \int_0^{\infty} \frac{\exp[-i(\beta_2 z + \beta_1 h)]}{\beta_2 + m\beta_1} J_0(kr) k dk, \quad (15)$$

где  $\beta_2 = \begin{cases} \sqrt{k_2^2 \cdot k^2}, & k_2 > k, \\ -i\sqrt{k^2 - k_2^2}, & k_2 < k, \end{cases}; k_2 = \frac{\omega}{c_2}; m = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ .

Зная потенциал прошедшей волны  $\varphi_{np.}$ , находим звуковое давление  $p_2$  в точке приема и получаем составляющие колебательной скорости  $v_z$  и  $v_r$ :

$$p_2 = -i\omega\rho_2\varphi_{np.} = -2\omega\rho_2 \int_0^{\infty} \frac{\exp[-i(\beta_2 z + \beta_1 h)]}{\beta_2 + m\beta_1} J_0(kr) k dk, \quad (16)$$

$$v_z = -\frac{\partial\varphi_{np.}}{\partial z} = 2 \int_0^{\infty} \frac{\exp[-i(\beta_2 z + \beta_1 h)]}{1 + m\beta_1/\beta_2} J_0(kr) k dk, \quad (17)$$

$$v_r = \frac{\partial\varphi_{np.}}{\partial r} = \frac{2}{i} \int_0^{\infty} \frac{\exp[-i(\beta_2 z + \beta_1 h)]}{\beta_2 + m\beta_1} J_1(kr) k^2 dk. \quad (18)$$

Потенциал  $\varphi_{np.}$  является комплексным, поскольку включает поля распространяющихся неоднородных волн (14). Высокочастотная асимптотика  $\varphi_{np.}$  может быть получена методом стационарной фазы, что приведет к приближению геометрической оптики, а расчет  $\varphi_{np.}$  в виде интеграла по берегам разрезов комплексной плоскости позволит выделить боковую волну. Тем самым приходим к высокочастотной асимптотике, которая приводит к известным результатам академика Л.М. Бреховских. [14].

Представляет известный практический интерес выполнение оценки для  $\varphi_{np.}$  в диапазоне крайне низких частот, когда  $\omega \rightarrow 0$ . Сравнительно просто это можно сделать в двух предельных случаях (рис. 2).

Первый случай:  $r = 0$ , приемник находится непосредственно под источником. Второй случай:  $r \gg z$  и  $h$ , приемник инфразвука находится на большем удалении от источника.

Пусть  $r = 0$ ;  $\omega \rightarrow 0$ . Тогда  $J_0(0) = 1$ ;  $\beta_1 \rightarrow -ik$ ;  $\beta_2 \rightarrow -ik$ , а выражение для потенциала прошедшей волны  $\varphi_{2np.}$  принимает вид:

$$\varphi_{2np.} \cong \frac{2}{m+1} \int_0^{\infty} \exp[-k(z+h)] dk = \frac{2}{(z+h)(m+1)} = \frac{2}{h+z} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (19)$$

поскольку  $m \gg 1$ . Отсюда для звукового давления  $p_2$  в точке приема можно записать:

$$p_2 = -i\omega\rho_2\varphi_{2np.} \cong \frac{2\rho_1}{h+z}. \quad (20)$$

Как следует из соотношения (19), на очень низких частотах звуковое поле в нижней среде характеризуется сферическим законом распространения и не зависит от показателя преломления на границе раздела. Следовательно, коэффициент передачи давления для приемника, расположенного непосредственно под источником, в волновом приближении при  $r = 0$  будет определяться зависимостью вида:

$$T_p|_{\omega \rightarrow 0} = 20 \lg \frac{p_2}{p_{1s}} = -20 \lg \frac{1+z/h}{2}. \quad (21)$$

Отсюда следует, что на низких частотах коэффициент передачи давления (21) при  $\omega \rightarrow 0$  асимптотически стремится к единице ( $n \rightarrow 1$ ).

Полученный вывод говорит о том, что на крайне низких частотах практически отсутствуют потери на преломление звуковых волн на границе раздела, что увеличивает коэффициент передачи по давлению. Анализируя полученное соотношение (20), приходим к следующему выводу: структура инфразвукового поля в нижней среде  $p_2$  мо-

жет быть представлена волновым процессом со сферическим законом распространения, который не зависит от показателя преломления на границе раздела. В то же время давление  $p_2$ , вычисленное для аналогичного случая в геометрическом приближении, содержит коэффициент  $n$ , характеризующий преломляющие свойства границы раздела.

Как показывают расчеты, произведенные для приближения геометрической оптики, при  $z=50$  м и  $h=10...15$  м коэффициент передачи давления составляет  $T_p = (-18.2)...(-21.5)$  дБ, что находится в хорошем согласии с данными, приведенными

$$\varphi_{2np} \cong \frac{2}{m+1} \int_0^{\infty} \exp[-k(r+h)] J_0(kr) k dk. \quad (22)$$

Интеграл, входящий в формулу (22), является табличным [16]. Тогда:

$$\varphi_{2np} \cong \frac{2}{mr} \cdot \frac{\Gamma(1/2)}{\sqrt{\pi} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z+h}{r}\right)^2}} \approx \frac{2}{mr \sqrt{1 + \left(\frac{z+h}{r}\right)^2}}, \quad (23)$$

поскольку гамма-функция  $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$ .

$$\text{При } r \gg (z+h), \varphi_{2np} \rightarrow \frac{2\rho_1}{\rho_2 r} \approx \frac{1}{r},$$

что соответствует сферическому закону распространения звуковой волны. Как видно из соотношения (23), низкочастотная асимптотика  $\varphi_{2np}$  не зависит от преломляющих свойств среды, а потери энергии при трансформации поля на границе раздела определяются только

$$T_p = 20 \lg \frac{p_2}{p_{1s}} = -20 \lg \frac{\sqrt{r^2 + (z+h)^2}}{2h} \cong -20 \lg \frac{r}{2h}. \quad (24)$$

Для проведения натурных экспериментальных исследований, связанных с изучением инфразвуковых полей, широко

в работе [13]. Расчет  $T_p$  по формуле (21) для тех же значений  $z$  и  $h$  дает  $(-6.6) - (-9.6)$  дБ.

Таким образом, в диапазоне крайне низких частот имеет место эффект величины в 11.5 дБ, выражающийся в увеличении «звукопрозрачности» границы раздела для данных величин  $z$  и  $h$ , что указывает на ощутимое «просветление» в инфразвуковой области.

Пусть  $r \neq 0$ ;  $\omega \rightarrow 0$ . В этом случае  $\beta_1 \rightarrow -ik$  и  $\beta_2 \rightarrow -ik$ , поскольку  $k_1 = \omega/c_1$  и  $k_2 = \omega/c_2$  близки к 0 при  $\omega \rightarrow 0$ . Потенциал прошедшей волны  $\varphi_{2np}$  имеет вид:

расширением фронта звуковой волны. Кроме того, на крайне низких частотах исчезает дипольная направленность звукового поля в воде от источника в воздухе, характерная для геометрического приближения. Коэффициент передачи давления при  $r \gg z+h$ ,  $\omega \rightarrow 0$  можно вычислить, если воспользоваться соотношением вида:

применение находят векторные приемники (приемники колебательной скорости и колебательного ускорения). В этой связи

представляет интерес оценка колебательной скорости в направлении координаты заглубления приемника  $z$  на крайне низ-

ких частотах ( $\omega \rightarrow 0$ ). Из (17) следует, что при  $\omega \rightarrow 0$   $\beta_1 \approx \beta_2 = -ik$ , поэтому:

$$v_z = \frac{2}{m} \int_0^{\infty} \exp[-k(z+h)] J_0(kr) k dk. \quad (25)$$

Интеграл (25) является табличным [16], поэтому

$$v_z = \frac{2}{m} \frac{2(z+h) \Gamma(3/2)}{[(z+h)^2 + r^2]^{3/2} \pi} \quad (26)$$

При  $r = 0$ :

$$v_z = \frac{4\rho_1 \Gamma(3/2)}{\rho_2 \sqrt{\pi} (z+h)^2} \cong \frac{1}{(z+h)^2} \quad (27)$$

Если  $r \gg z+h$ , то

$$v_z = \frac{4\rho_1}{\rho_2 r^3} \cdot \frac{z+h}{\left[1 + \left(\frac{z+h}{r}\right)^2\right]^{3/2}} \approx \frac{4\rho_1}{\rho_2 r^2} \cdot \frac{z+h}{r} \sim \frac{1}{r^2}. \quad (28)$$

Отсюда следует, что колебательная скорость убывает с расстоянием быстрее, чем звуковое давление.

Аналогично, когда  $\omega \rightarrow 0$ , табличным является и интеграл, входящий в определение горизонтальной составляющей колебательной скорости. При  $r \rightarrow 0$ ,  $\omega \rightarrow 0$ ,  $v_x \rightarrow 0$ :

$$v_x = \frac{2}{m+1} \int_0^{\infty} \exp[-k(z+h)] J_1(kr) k dk = \frac{4r}{\sqrt{\pi}(m+1)} \cdot \frac{\Gamma(3/2)}{[(z+h)^2 + r^2]^{3/2}} \approx \approx 4 \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\Gamma(3/2)}{\sqrt{\pi}} \frac{r}{[(z+h)^2 + r^2]^{3/2}}. \quad (29)$$

$$\text{При } r \gg (z+h), \omega \rightarrow 0: \quad v_x = \frac{4\rho_1 \Gamma(3/2)}{\rho_2 \sqrt{\pi} r^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{z+h}{r}\right)^2\right]^{-3/2} \sim \frac{1}{r^2}.$$

Вычислим соотношение колебательных скоростей  $v_z$  и  $v_r$  при  $r \gg z+h$

$$\frac{v_z}{v_r} \Big|_{r \gg z+h} = \frac{z+h}{r} \ll 1. \quad (30)$$

Из соотношения (30) непосредственно вытекает важный вывод. Если исследователь в качестве воспринимающих элементов использует приемники колебательной скоро-

сти или ускорения, то на больших удалениях от источника по горизонтали такой приемник при одинаковой чувствительности по каналам  $z$  и  $r$  будет воспринимать сигнал

на канале  $r$ . Напротив, при нахождении приемника колебательной скорости под источником на больших глубинах предпочтительным является использование канала  $z$ .

Практический интерес представляет также вычисление коэффициента преобразования давления в падающей звуковой волне (в воздухе) на уровне границы раздела ( $p_{1s}$ ) в колебательную скорость в точке приема с составляющими  $v_z$  и  $v_r$ . Физический смысл такого коэффициента состоит в том, что он является переходным волновым импедансом  $Z$  для звуковой волны  $p_{1s}$  и звуковой

волны в точке приема:

$$Z_z = \frac{p_{1s}}{v_z}; \quad Z_r = \frac{p_{1s}}{v_r} \quad (31)$$

Здесь  $Z_z$  и  $Z_r$  – переходные волновые импедансы, в общем случае комплексные, для координатных направлений ( $z$  и  $r$ ). Если в (31) нормировать импедансы на волновое сопротивление воды  $\rho_2 c_2$ , то коэффициенты преобразования поверхностного давления можно представить в следующем виде:

$$T_{pv_z} = 20 \lg \frac{|Z_z|}{\rho_2 c_2}; \quad T_{pv_r} = 20 \lg \frac{|Z_r|}{\rho_2 c_2} \quad (32)$$

Последние выражения удобны для экспериментатора, измеряющего звуковое поле в воздухе микрофоном или гидрофоном (если требуется приемник звука установить у самой границы раздела и исключить влияние «шлепков» воды), а звуковое поле под водой – приемником колебательной скорости. Подставляя в (32) соотношения (31) и выражая в них  $v_z$  для источника звука на высоте  $h$  над поверхностью, создающего под собой у поверхности звуковое давление  $p_{1s} = i\omega\varphi_1/h$ , коэффициенты  $T_{pv_z}$  и  $T_{pv_r}$  можно записать в следующем виде:

$$T_{pv_z} = -20 \lg \frac{4\Gamma(3/2)}{\sqrt{\pi} k_2 r} \cdot \frac{h(z+h)}{r^2 \left[1 + \frac{(z+h)^2}{r^2}\right]^{3/2}}; \quad k_2 = \frac{\omega}{c_2}. \quad (33)$$

$$\text{При } r=0: \quad T_{pv_z} = -20 \lg \frac{4h\Gamma(3/2)}{\sqrt{\pi} k^2 (z+h)^2} = -20 \lg \frac{4h\Gamma(3/2)}{\sqrt{\pi} (z+h)} \cdot \frac{1}{k^2 (z+h)}.$$

$$\text{При } r \gg z+h: \quad T_{pv_z} = -20 \lg \frac{4\Gamma(3/2)}{\sqrt{\pi} k_2 r} \cdot \frac{h(z+h)}{r^2}.$$

Из формулы (28) видно, что на низких частотах  $k_2(z+h) \rightarrow 0$  и  $T_{pv_z}$  является весьма большой отрицательной величиной, и это требует применения приемника колебательной скорости с большой чувствительностью по каналу  $z$ .

Коэффициент  $T_{pv_r}$  имеет смысл только для точек наблюдения, удаленных по горизонтали от источника на расстояние  $r \neq 0$  ( $v_r|_{r=0} = 0$ ).

$$T_{pv_r} = -20 \lg \frac{4\Gamma(3/2)}{\sqrt{\pi} k_2 r} \cdot \frac{h}{r} \cdot \left[1 + \frac{(z+h)^2}{r^2}\right]^{-3/2} \quad (34)$$

На значительных удалениях  $T_{pv_r}$  также является большой отрицательной величиной, что требует высокой чувствительности от приемника скорости по каналу  $r$ .

В связи с большими переходными волновыми сопротивлениями  $Z_z$  и  $Z_r$ , что приводит к малым амплитудам колебательной скорости  $v_z$  и  $v_r$ , целесообразно также рассмотреть случай, когда звуковое поле в воздухе непосредственно у границы раздела в падающей волне измеряется приемником колебательной скорости и аналогичным приемником измеряется звуковое поле под водой в точке приема:

$$T_{v_z v_z} = -20 \lg \frac{|(v_{zs})|}{|v_z|}; \quad T_{v_r v_r} = -20 \lg \frac{|(v_{rs})|}{|v_r|}, \quad (35)$$

Следует отметить, что возможность увеличения «прозрачности» границы раздела на инфразвуковых частотах продемонстрирована с применением асимптотического метода и полученные эффекты являются предельными. Они полностью справедливы при  $\omega \rightarrow 0$ . Очевидно, что с ростом частоты указанные эффекты будут уменьшаться вследствие возрастания потерь энергии на преломление. Дальнейший рост частоты делает справедливым приближение геометрической оптики, и возникают такие явления, как полное внутреннее отражение, наличие критического угла падения (для воды  $\theta_{sp} = 13^\circ$ ). Формально распространяя приближение геометрической оптики в область инфразвуковых частот, можно заметить, что показатель преломления  $n$  стремится к единице с понижением частоты. Это обстоятельство приводит к тому, что  $\theta_{sp}|_{f \rightarrow 0} \rightarrow \pi/2$ .

Обращает на себя внимание и отсутствие направленности в поле давления, но наличие ее по каналам  $z$  и  $r$  колебательной скорости.

Другой класс прикладных задач связан с инфразвуковыми полями на границе раздела «морское дно – водный слой».

В этой связи обратимся к анализу процессов трансформации инфразвуковых полей на границе раздела «морское дно – водный слой». Здесь в водной среде возникают квазиперпендикулярные волновые структуры, которые удается выделить в результирующих гидроакустических полях. Проанализируем эту задачу более подробно.

В 1885 году Дж. Стретт (лорд Рэлей) теоретически показал, что вдоль границы твердого упругого полупространства с вакуумом или другой достаточно разреженной средой (например, с воздухом) могут распространяться волны, амплитуда которых быстро спадает от границы раздела. Эти волны, названные впоследствии рэлеевскими, являются одним из основных типов волн, наблюдающихся при землетрясениях. Именно поэтому они достаточно подробно изучены в геофизике.

В ряде случаев рэлеевскими называют волны не только на границе упругой среды с вакуумом, но также и поверхностные волны, возникающие на границе упругого полупространства с жидкостью, как это имеет место в море. Такие волны, распространяясь вдоль границы раздела сред, несут полезную информацию об источниках звука, которые могут находиться как в упругом полупространстве, так и в жидкости. Они широко используются в прикладных технологиях при решении задач, связанных с изучением предвестников геофизических катастроф,

при изучении строения верхних слоев литосферы, в задачах поиска и разведки полезных ископаемых и в других прикладных задачах. Именно поэтому интерес к изучению этого типа волн с годами не ослабевает.

Однако некоторые возникающие волновые структуры остались пока вне поля зрения акустиков. Так, не получили достаточного освещения в литературе задачи о распространении энергии в слое жидкости, когда колебания лежат в крайне низкочастотном (сейсмоакустическом) диапазоне. В фундаментальной постановке эта проблема была проанализирована в среднечастотном акустическом диапазоне академиком Л.М. Бреховских. Тем не менее ряд появившихся прикладных задач требует к себе постоянного внимания и расширения частотного диапазона.

Натурные наблюдения дают основание полагать, что при переходе к сверхниз-

ким (сейсмоакустическим) частотам характер волновых процессов в мелком море определяются достаточно специфическими границами раздела «вода – воздух» и «вода – грунт». В этом случае роль структурных особенностей дна становится определяющей. Этот волновод более устойчив по характеристикам, чем звуковой канал, а само поле в нем имеет ряд особенностей, на которых мы остановимся ниже.

Далее перейдем к рассмотрению структуры сейсмоакустического поля, возникающего при развитии волнового процесса в «мелком» море.

Пусть звуковая волна распространяется вдоль положительного направления оси X (рисунок 3). Ось Z направим вверх. Начало координат расположим на границе «вода – твердое тело (твердое дно)».

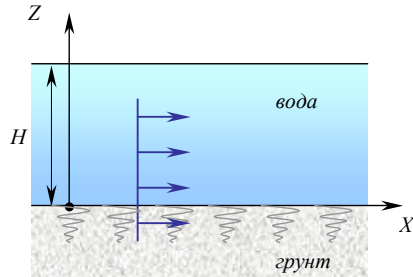


Рисунок 3 – Структура сейсмоакустического поля, возникающего при развитии волнового процесса в мелком море

В рассматриваемом случае уравнение движения для твердого тела, как и является дно моря, запишется в виде:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}_e}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \text{grad div } \bar{u}_e.$$

Соответственно, для жидкости (морской

среды) имеем:

$$\Delta \Phi + K_b^2 \Phi = 0 \quad (36)$$

Здесь:  $K_b = \frac{\omega}{C_b}$ ;  $C_b$  – фазовая скорость зву-

ковых волн в жидкости;  $\bar{u}_e = \text{grad } \Phi$  – вектор смещений частиц воды;  $\bar{U}$  – вектор

смещения частиц;  $\bar{U} = \bar{U}_e + \bar{U}_z$ , причём  $U_e = \text{grad } \varphi$ , а  $U_z = \text{rot } \psi$ ;  $\rho$  – плотность упругой среды;  $\lambda$  и  $\mu$  – упругие постоянные (коэффициенты Ламе) твердой среды (дна моря).

Опуская промежуточные выкладки, выпишем основные выражения, определяющие значения вертикальной и горизонтальной составляющих колебательной скорости в воде.

В рассматриваемом случае они будут иметь вид:

$$V_z = A\omega \frac{K_b^2 \sqrt{1 - \zeta_b^2} a}{(2 - \zeta_b^2 b^2)} \frac{\cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda_R} \frac{H-Z}{\sqrt{\zeta_b^2 - 1}} \right]}{\cos \left[ \frac{2\pi H}{\lambda_R} \sqrt{\zeta_b^2 - 1} \right]} \exp \left[ j \left( KX - \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (37)$$

$$V_x = A\omega \frac{K_b^2 \sqrt{1 - \zeta_b^2} a}{(2 - \zeta_b^2 b^2)} \frac{1}{\sqrt{\zeta_b^2 - 1}} \frac{\sin \left[ \frac{2\pi(H-Z)}{\lambda_R} \sqrt{\zeta_b^2 - 1} \right]}{\cos \left[ \frac{2\pi H}{\lambda_R} \sqrt{\zeta_b^2 - 1} \right]} \exp [j(KX - \omega t)];$$

Анализируя последние соотношения, особое внимание обратим на низшую воду, дисперсия для которой существенно меньше и где есть области при  $\lambda_R \gg H$  и  $\lambda_R \ll H$ .

Если для случая  $\lambda_R \ll H$  рассмотреть колебания в грунте и написать формулы для смещения  $U_x$  и  $U_z$ , то окажется, что наддисперсионный участок на высоких частотах (в области коротких волн) соответствует волнам, распространяющимся вдоль границы «грунт – вода». Действительно, в этом случае  $\zeta_b < 1$  и  $\frac{2\pi H}{\lambda_R}$  достаточно велико. При малых

$\frac{2\pi H}{\lambda_R}$  и  $\zeta_b = 1,8 - 1,84$  скорость сейсмогидроакустических волн почти постоянна на глубине (см. выражение (37)), а вертикальная компонента значительно превосходит горизонтальную (акустическое давление в воде при этом оказывается достаточно малым). Это означает, что в море, когда  $H \leq \lambda_R$ , могут возникать особые сейсмогидроакустические волны, распространяющиеся в горизонтальном направлении (вдоль оси X). При

этом смещение частиц жидкости имеет преимущественно вертикальное направление. Это своеобразные «квазипоперечные» волны (термин предложен сотрудником ИФЗ РАН В.А. Дубровским). Они могут быть обнаружены только векторными приемниками, размещаемыми в водном слое и имеющими плотность, приближенную к плотности воды.

Таким образом, волны Рэлея, реально существующие на границе раздела «морское дно – вода», в геоакустическом диапазоне частот порождают в водной среде своеобразные псевдодолговые структуры. Эти псевдодолговые структуры, обладая почти постоянной по глубине скоростью, имеют ряд характерных особенностей, а именно: вертикальная компонента колебательной скорости значительно превосходит горизонтальную компоненту; акустическое давление в поле гидроакустических волн мало; фазовые характеристики по глубине остаются практически постоянными.

Другими словами, во всех случаях, когда длина волны Рэлея превышает глубину моря, можно наблюдать в морской среде особые сейсмогидроакустические (своего

рода «квазиперечные» волновые структуры) волны, распространяющиеся в горизонтальном направлении в воде со скоростью волн Рэлея в грунте.

С такими структурами впервые столкнулись Л.Е. Собисевич и известный экспериментатор А.А. Барихин на черноморских полигонах «Гидроприбора» в начале 1960-х гг., когда проводили испытания образцов изделий. Оказалось, что структура зафиксированного сейсмогидроакустического сигнала от локального источника в море на глубине 400 метров и на суше практически совпадают.

### ВЫВОДЫ

Решение общей задачи формирования сейсмоакустических полей в слоистой морской среде («атмосфера – вода – дно») позволило детально рассмотреть ряд прикладных задач.

Применительно к формированию инфразвукового поля в воде при нахождении источника шума в воздухе показано, что на крайне низких частотах практически отсутствуют потери на преломление звуковых волн на границе раздела «воздух – вода», что увеличивает коэффициент передачи по давлению, вследствие чего происходит своеобразное «просветление» поля в этой области частот. Полученные результаты указывают на возможность обнаружения летательных аппаратов из-под воды. Наиболее эффективным средством для этой цели

могут быть многокомпонентные векторные приемники (колебательной скорости или колебательного ускорения). Причем в ближней зоне эффективным будет канал регистрации вертикальной компоненты колебательной скорости (ускорения), а в дальней зоне – горизонтальные каналы, которые наряду с обнаружением летательных аппаратов могут позволить определить направление их полета.

В результате анализа процессов трансформации инфразвуковых полей на границе раздела «морское дно – вода» показано возникновение вблизи дна «квазиперечных» волн, порождаемых волнами Рэлея в результирующих гидроакустических полях и несущих полезную информацию об источнике звука. Рассмотрение структуры сейсмоакустического поля, формирующегося при развитии волнового процесса в «мелком» море, позволило установить, что эти «квазиперечные» волны, в которых вертикальная компонента колебательной скорости существенно превышает горизонтальную, распространяются вблизи дна на большие расстояния со скоростью волн Рэлея в грунте. Регистрация этих волн в инфразвуковом диапазоне частот с использованием векторных приемников может позволить производить дальнейшее обнаружение ПЛ при постановке приемников как в воде, так и в скважинах на суше.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources // A summary. Ann. geophys. 1985. V. 3. No. 5. P. 673-687.
2. Miller G.F., Pursey H. On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1955. V. 233. No. 1192. P. 55-69.

3. Гуцин В.В., Докучаев В.П., Заславский Ю.М., Конохова И.Д. О распределении мощности между различными типами излучаемых волн в полубезграничной упругой среде. // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками / Под ред. А.В. Николаева. – М.: Наука, 1981. – С. 113-118.
4. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1 Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 520 с.
5. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 284 с.
6. Чичинин И.С. Вибрационное излучение сейсмических волн. – М.: Недра, 1984. – 224 с.
7. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
8. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 416 с.
9. Разин А.В. Возбуждение акустической и вытекающей волн в атмосфере подповерхностным сейсмическим источником // Изв. вузов. Радиофизика. – 2006. – Т.49? №7. – С. 577-592.
10. Разин А.В. Особенности излучения поверхностной волны Стонели, возбуждаемой гармоническим силовым источником на границе раздела твердое тело – газ // Изв. вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 4. – С. 304-313.
11. Разин А.В. Излучение поверхностных волн Стонели распределенными силовыми источниками, действующими на границе раздела Земля – атмосфера // Изв. вузов. Радиофизика. – 2007. – Т.50, №7. – С. 624-637.
12. Разин А.В. Излучение поверхностной и вытекающей волн на границе раздела твердое тело – газ // Изв. вузов. Радиофизика. – 2002. – Т.45, №4. – С. 354-360.
13. Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – 297 с.
14. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1957. – 502 с.
15. Уоррен Хортон Дж. Основы гидроакустики. – М., 1961.
16. Градштейн Н.С., Рыжик Н.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: ГИ ФМЛ, 1963. – С. 110.



к.т.н. В.М. АГАФОНОВ, к.т.н. В.П. ДМИТРИЧЕНКО,  
к.ф.-м.н. Д.А. ПРЕСНОВ, д.ф.-м.н. А.Л. СОБИСЕВИЧ,  
д.т.н. Л.Е. СОБИСЕВИЧ

### ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ИННОВАЦИОННОЙ ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ЛЕДОВОГО КЛАССА ДЛЯ МОНИТОРИНГА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Проведен анализ возможности создания геоакустических антенных систем ледового класса, предназначенных для мониторинга морской среды подо льдом. Показано, что при создании таких систем следует применять специализированные ледовые буи для регистрации сейсмо- и гидроакустических колебаний с использованием геоакустических антенных систем мониторинга морских акваторий Арктики с поверхности ледового покрова. Результаты лабораторно-стендовых испытаний макета геоакустического буя показали, что он может быть использован в качестве основного звена подобных систем ледового класса.

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы районы Арктики становятся определяющими при выработке стратегии обеспечения обороноспособности России. В настоящее время подводные ракетноносцы стран НАТО достаточно свободно плавают в Арктике под защитой ледового покрова и могут бесконтрольно выходить к нашим северным границам. В утвержденной президентом РФ «Стратегии развития арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности в этом регионе до 2020 года» указано на отсутствие средств постоянного комплексного мониторинга арктических территорий и акваторий. Поэтому в настоящее время Арктика – это, по сути дела, природный полигон для подводных ракетноносцев, в том числе и нашего потенциального противника, откуда они могут нанести ракетные удары по территории России, находясь под защитой льда. По мнению американского командования, их подводные ракетноносцы имеют неограниченный доступ в Арктику и могут находиться там постоянно, пока в России не появятся эффективные средства обнаружения АПЛ в покрытых льдом акваториях северных морей.

План работ внештатной лаборатории фундаментальных проблем в числе первоочередных задач поставил исследования низкочастотных геоакустических полей, наведенных подвижными подводными объектами в морской среде при наличии ледового покрова, и развития геоакустических систем освещения подледной обстановки, включая использование распределенных антенных систем ледового класса. Для решения этих проблем на первый план выходит необходимость разработки методов и средств многопараметрического мониторинга северных морей, обеспечивающего поступление актуальной информации о пространственно-временной изменчивости геофизических полей в масштабе контролируемого региона с выходом на раннее обнаружение малозумных АПЛ подо льдами. Решение этой проблемы должно основываться на теоретическом и экспериментальном исследовании волновых процессов различной природы в сложной гидрофизической среде Арктики. Эти работы должны быть подкреплены и построением соответствующих оборонительных систем на островах северных морей.

Основной задачей, определяющей возможность успешного контроля и предотвращения проникновения возможного противника в регионы российской Арктики под ее льдами, является обнаружение обесшумленных АПЛ. Реализация этой задачи возможна на основе построения современных низкочастотных гидроакустических систем ледового класса. Наиболее эффективным современным средством обнаружения АПЛ является активная гидролокация. Однако, принимая во внимание географические и гляциологические особенности арктических территорий России, можно утверждать, что постоянное гидролокационное наблюдение за подледной обстановкой в Арктике труднореализуемо. Одним из возможных путей решения этой проблемы является использование рубежных систем обнаружения. Это могут быть как вмороженные в лед гидроакустические антенны, со-

ставленные из ряда низкочастотных комбинированных векторно-фазовых приемных систем, так и роботизированные донные или придонные подвижные и площадные информационно-измерительные системы, управляемые со спутника через вмороженный модуль (рисунок 1). Во всех случаях эффективным будет применение PV-приемников, обладающих пространственной избирательностью во всем рабочем диапазоне частот. Повышение потенциала таких систем возможно при создании линейных вертикальных антенн, что позволит дополнительно увеличить пространственную избирательность по сравнению с одиночными PV-приемниками. Это создает теоретические предпосылки повышения поискового потенциала систем с комбинированными PV-приемниками для решения задачи обнаружения обесшумленных АПЛ подо льдами.

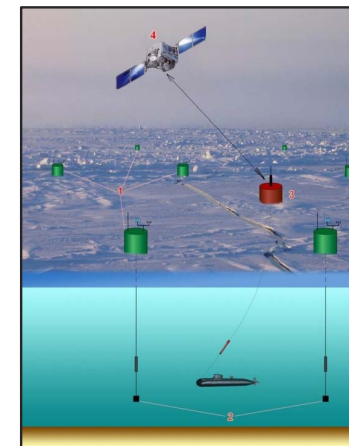


Рисунок 1 – Система вмораживаемых в лед геоакустических буев

Другой характерной особенностью АПЛ является наличие стального корпуса, создающего локальные возмущения магнитного поля Земли. С учетом этого в каче-

стве дополнительного канала для обнаружения АПЛ могут использоваться детекторы магнитных аномалий, чувствительных к изменениям локального геомагнитного

поля. Однако реализация геомагнитного канала в составе систем подводного наблюдения требует дополнительных исследований.

В итоге создание систем подледного наблюдения в Арктике целесообразно на основе использования низкочастотных геогидроакустических антенн ледового класса, отслеживающих сейсмическую и гидроакустическую информацию в подледных условиях с возможным использованием в качестве дополнительного обнаружителя АПЛ детекторов магнитных аномалий. Верхняя часть этих антенн должна быть выполнена в виде вмороженного в лед модуля, в котором будет обеспечиваться обработка полученной информации об обнаруженных объектах подо льдом и местонахождении буя в текущий момент времени. Для уточнения факта обнаружения подледной цели сеть антенных систем может быть оснащена источниками, излучающими гидроакустические сигналы по заданной программе в установленных частотных диапазонах и интервалах времени, обеспечивая тем самым своеобразную акустическую «подсветку». Сигналы, рассеянные подледной неоднородностью (АПЛ), будут восприняты сетью векторно-скалярных датчиков в составе вмороженных в лед геогидроакустических буев. В результате обработки этих сигналов с учетом местоположения буев могут быть определены и переданы по спутниковой связи на командный пункт обороны координаты обнаруженной АПЛ. Таким образом может быть реализована задача обнаружения потенциальной опасности из-под льда Арктики.

С другой стороны, недостаточно изученные, но предположительно очень богатые углеводородными ресурсами районы шельфа северных морей определяют необходимость их геологоразведки и изучения вплоть до детального картографирования. При наличии ледового покрова хорошо отработанная и широко используемая технология морской сейсморазведки с использованием сейсмокос весьма затруднительна и требует создания специального подводного носителя, способного длительное время

находиться подо льдами. Разрабатываемые новые технологии зондирования морского дна на основе анализа распространения изгибно-гравитационных волн позволяют решить эту же задачу на основе анализа информации, получаемой системой геогидроакустических приемников ледового класса.

Следует отметить, что многие элементы рассматриваемой инновационной системы мониторинга северных морей уже разработаны по отдельности, прошли испытания и используются для разовых наблюдений в арктическом регионе. Так, например, приемники градиентного типа используются в подводных системах освещения подводной обстановки, а системы спутниковой связи широко применяются для передачи информации с измерительных буев, расположенных на поверхности льда. Возможность использования существующих разработок, зарекомендовавших себя при натурных испытаниях в арктических условиях, является преимуществом рассматриваемого подхода для создания на их основе нового поколения систем наблюдений ледового класса.

#### **КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ЛЕДОВОГО КЛАССА**

Государственная стратегия освоения Арктики ставит перед учеными РФ ряд сложных и пока не решенных до конца проблем, связанных с мониторингом донных структур и водной среды в интересах обеспечения национальной безопасности и разведки запасов углеводородов в покрытых льдами морях Арктики. Принимая это во внимание, сотрудники внештатной лаборатории фундаментальных проблем АО «Концерн «МПО – Гидроприбор» инициативно выполнили ряд работ по разработке отдельных элементов геогидроакустических систем ледового класса. Схема одного из вариантов макетного образца специализированного геогидроакустического модуля для использования в антенных системах ледового класса приведена на рисунке 2.

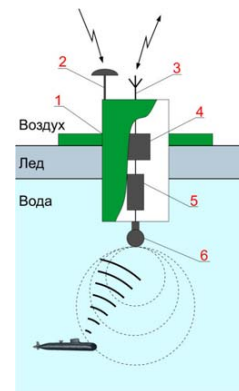


Рисунок 2 – Структурная схема автономного вмороживаемого геогидроакустического модуля:  
1 – корпус, 2 – антенна ГЛОНАСС (GPS), 3 – антенна передачи данных, 4 – блок управления, 5 – блок питания, 6 – чувствительный элемент или антенна

Научные результаты, полученные в процессе испытаний разработанных модулей, позволили определить структуру геогидроакустических антенных систем ледового класса для мониторинга слоистых сред типа «морское дно – водный слой – ледовый покров». Нужно отметить, что успешное применение нового класса геогидроакустических измерителей стало возможным благодаря созданию технологии глубинного мониторинга неоднородных слоистых геологических структур на поверхностных волнах [1]. Эта технология реализована как в формируемых геогидроакустических системах, так и в отдельных сейсмометрических станциях, основу которых составляют вмороживаемые в лед геогидроакустические буи. Последние позволяют вести одновременную регистрацию геогидроакустических сигналов, распространяющихся во льду, в водной среде и морском дне.

Разработка нового класса геогидроакустических модулей позволила провести

значительный объем экспериментальных исследований в ледовых условиях. Изучались подледные шумы, обусловленные динамическими процессами в системе «дно – водный слой – ледовый покров» при наличии ветровых помех, помех, связанных с торшением ледовых структур, и других экстремальных условий на акватории. Данные о характеристиках этих шумов стали определяющими при построении рабочих макетов геогидроакустических буев ледового класса.

Полученные в процессе выполнения научных работ результаты позволили определить требования к современным низкочастотным геогидроакустическим антенным модулям ледового класса, которые должны:

- быть автономными;
- обладать устойчивой работоспособностью в экстремальных условиях северных морей;

- иметь малозаметные элементы, выходящие на поверхность льда;

- обеспечивать на их основе возможность формирования многоэлементных геогидроакустических антенных систем ледового класса.

Использование таких систем целесообразно с реализацией двойных технологий, позволяющих решать задачи освещения подледной обстановки как для обнаружения малозаметных АПЛ, так и для проведения геологоразведки месторождений углеводородов.

Среди основных требований к новому поколению геогидроакустических антенных систем ледового класса следует выделить:

- возможность сбора информации о подледной обстановке с высоким разрешением и высокой точностью по пространственным координатам и по временной шкале с передачей данных на командный пункт в режиме, близком к режиму реального времени;

- умеренную стоимость, что позволит использовать большое количество рассматриваемых геогидроакустических антенных систем ледового класса для создания глобальных систем наблюдения, а также в

определенных случаях обеспечит возможность их однократного использования, то есть избежать дополнительных затрат на поиск и доставку на берег отработавших боевое дежурство информационных модулей;

– возможность обработки и передачи информации как через стандартные протоколы, так и через специальные зашифрованные стандарты, в том числе для целей акустической подводной связи с автономными аппаратами навигации и спутниковой ретрансляции данных.

В качестве чувствительных элементов геоакустических модулей могут использоваться различные типы многокомпонентных векторно-фазовых приемников,



Рисунок 3 – Модификации комбинированных векторно-фазовых пьезокерамических приемников.

включая электродинамические, пьезокерамические, электрохимические. Проработка макетных образцов геоакустических модулей была произведена на базе освоенных в производстве пьезокерамических и молекулярно-электронных приемников. Две модификации четырехкомпонентных пьезокерамических приемников колебательного ускорения представлены на рисунке 3. В составе приемников имеются малошумящие предварительные усилители с шумовым порогом по колебательному ускорению  $(3\div 7) \cdot 10^{-8}$  м/с<sup>2</sup> на частоте 1 Гц. Основные характеристики пьезокерамических комбинированных приемников приведены в таблице 1 [2].

Таблица 1 – Основные характеристики геоакустических приемников

Сейсмоакустические каналы (X, Y, Z)	
воспринимающий элемент	пьезокерамический
электрическая емкость	1,3...1,5 нФ
чувствительность	0,2 Вc <sup>2</sup> /м (1,8 В/g)
частотный диапазон	0,003 – 100 Гц
характеристика направленности	$R(\alpha) = \cos(\alpha)$
динамический диапазон, не менее	120 дБ
Канал давления (P)	
воспринимающий элемент	пьезокерамический
чувствительность	200 мкВ/Па
электрическая емкость	2000 пФ
частотный диапазон	1,0– 1200 Гц
характеристика направленности	$R(\alpha) = 1$
динамический диапазон, не менее	100 дБ

Продолжение таблицы 1

Общие параметры	
коэффициент усиления предварительного усилителя	10...20
средняя плотность	$1 \times 10^3$ кг/м <sup>3</sup>
прочность при воздействии одиночных ударов	2000 м/с <sup>2</sup>
зависимость чувствительности от наклона осей	отсутствует
масса	до 10 кг
срок службы, не менее	10 лет

Относительно простые и удобные в эксплуатации пьезокерамические приемники имеют преимущества в использовании на частотах выше 1 Гц, поскольку на более низких частотах у них существенно возрастают соб-

ственные шумы. В связи с этим для экспериментальных исследований в более низком частотном диапазоне были использованы также молекулярно-электронные векторные приемники, схема которых приведена на рисунке 4.

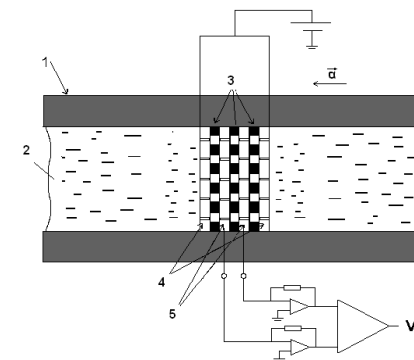


Рисунок 4 – Схема молекулярно-электронного приемника: 1 – керамическая или стеклянная трубка; 2 – электролит; 3 – пористые керамические перегородки; 4 – аноды; 5 – катоды; а – внешнее механическое ускорение; out – выходной сигнал

Работа таких приемников основана на том, что прохождение тока определяется гидродинамическим движением раствора электролита под действием внешних механических возмущений [3, 4]. Скорость химической реакции на электродах приемника значительно больше скорости доставки к ним реагирующих веществ. Поэтому при протекании реакции в приемнике появляется градиент концентрации реагирующих веществ, и перенос заряда в неподвижном

электролите осуществляется с помощью молекулярной диффузии от одного электрода к другому. На рисунке 5 показан шестикомпонентный датчик, в конструкцию которого включены три ортогональных чувствительных элемента молекулярно-электронных короткопериодных сейсмометров и три чувствительных элемента, регистрирующих крутильные колебания. Основные характеристики молекулярно-электронного приемника приведены в таблице 2.

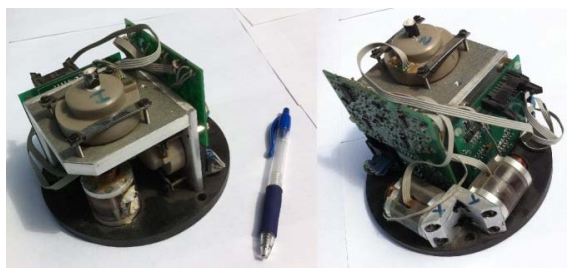


Рисунок 5 – Шестикомпонентный молекулярно-электронный приемник без корпуса

Таблица 2 – Параметры молекулярно-электронного приемника

Полоса частот	0.033 (30 сек) - 50 Гц
Коэффициент преобразования	2000 В/(м/с) - дифф. выход
Макс. регистрируемый сигнал	$\pm 5,0$ мм/с
Интегральный шум в полосе 0.033 - 50 Гц	76 нм/сек
Питание / потребление сейсмометра	10.5-30В @ 12 мА (стандартная)
Температурный диапазон работы	(-40 +55 °С)
Допустимый угол установки	$\pm 15^\circ$
Масса	0.4 кг

Применение этих приборов в практике экспериментальных морских измерений и полевых работ на суше позволило реализовать самые прогрессивные технологии мониторинга слоистых геофизических (гидрофизических) структур. Однако следует иметь в виду, что у этого типа приемников есть проблемы с обеспечением их ударопрочности, а температура их эксплуатации должна быть не ниже температуры замерзания электролита ( $-20^\circ\text{C}$ ). Тем не менее для исследовательских целей этот сверхнизкочастотный приемник оказался очень удобен даже при ледовых испытаниях, когда температура воздуха была не ниже  $-10^\circ\text{C}$ .

На основе пьезокерамических и молекулярно-электронных датчиков были изготовлены рабочие макеты геоакустических модулей, выполненных в виде цилиндрических буюв (рисунок 6), предназначенных для автономной регистрации сейсмических и гидроакустических сигналов при экспериментальной отработке технологии мониторинга подледной обстановки в экспедиционных условиях. Каждый модуль способен осуществлять передачу данных по проводному или беспроводному интерфейсу. Одновременно была отработана возможность объединения нескольких модулей в единую информационную сеть.



Рисунок 6 – Макеты геоакустических модулей на выставке и на испытаниях

Созданные рабочие макеты геоакустического модуля прошли испытания в сложных ледовых условиях, приближенных к условиям Севера, и показали, что они могут эффективно собирать полезную геоакустическую информацию. Эта авторская инновационная разработка защищена патентом [5]. Регистратор предназначен для использования в составе автономных систем сбора данных с батарейным питанием. Модуль отличается малым энергопотреблением – менее 300 мВт в процессе регистрации, что позволяет при относительно малых габаритах устройства существенно увеличить время автономной работы. Для передачи данных и конфигурирования системы используются проводное USB- или беспроводное Wi-fi-соединение, а 32 Гб внутренней памяти позволяют вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. В регистраторе имеются цепи для подачи тестовых сигналов на датчики.

Интегрированный модуль GPS позволяет синхронизировать получение информации с точным мировым временем, автономно запускать и останавливать запись по заданному расписанию, идентифицировать географическую точку расположения модуля для индивидуализации модулей в составе сети.

Модуль помещен в прочный герметичный корпус со степенью защиты не ниже IP 67. На верхнюю крышку модуля выведена внешняя антенна GPS-модуля и герметичный многофункциональный разъем типа PC-10. Разъем обеспечивает возможность зарядки аккумулятора модуля, чтение данных с регистратора, программирование цифрового модуля, световую индикацию работы устройства и наличия спутникового сигнала GPS. При подключении светоиндикативной заглушки к разъему на электронные платы прибора поступает энергоснабжение от внутреннего аккумулятора.

Разработанное программное обеспечение выполняет следующие функции: отображение списка устройств и статусных данных (координаты, синхронизация часов, ориентация и т. п.), а также отображение и сохранение во внутренней памяти сейсмограмм для одного или нескольких устройств.

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНО-СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ**

Ледовым испытаниям с использованием измерительных модулей предшествовали лабораторно-стендовые (обсерваторские) эксперименты, проведенные в заглубленных боксах на измерительных постамен-



тах геофизического комплекса Геофизической службы РАН. Эти эксперименты позволили сопоставить амплитудные и фазовые частотные характеристики геогидроакустических буев с прецизионными сейсмометрами. В качестве эталонного сейсмометра использовался велосиметр электродинамического типа Guralp CMG-3ESP.

На рисунке 7 представлено сопоставление частотных характеристик сейсмометра Guralp с частотными характери-

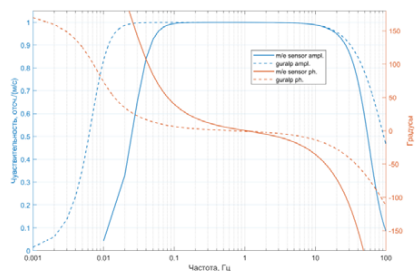


Рисунок 7 – Амплитудно-частотная характеристика – темные цвета; фазочастотная характеристика – светлые цвета; сплошная линия – СМЕ, пунктирная линия – Guralp

Результаты обзорного эксперимента показали, что основные параметры созданного макета геогидроакустического буя ледового класса стабильны в диапазоне частот 0,03-50 Гц. По всем основным характеристикам разработанная информационно-измерительная система геогидроакустического буя не намного уступает современным образцам сейсмометров мирового уровня, а разработанные и использованные программы сбора, обработки и передачи информации являются достаточно надежными.

### **ОБЛИК СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОДЛЕДНОЙ ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ БУЕВ**

Создание системы комплексной безопасности арктической зоны РФ остро ставит вопрос о развитии нового класса обнаружителей, отдельные элементы которых должны быть вморожены в лед. Речь идет прежде

ками геогидроакустического буя с молекулярно-электронным датчиком (СМЕ). Сейсмометр Guralp имеет высокую чувствительность в низкочастотном диапазоне вплоть до периода 100 секунд (0,01 Гц) с частотой ограничения сверху 20 Гц. (В настоящей работе рассматривается оптимальный частотный диапазон 0,03-10 Гц.) В период проведения обзорного эксперимента температура составляла  $\sim 12^{\circ}\text{C}$  при постоянной влажности.

всего о построении своеобразной геогидроакустической платформы ледового класса, в составе которой в качестве основных конструктивных элементов применяются рассмотренные выше модули (см. рисунок 1).

Такая геогидроакустическая платформа формируется в регионе ответственности специальной командой. Для развертывания геогидроакустической платформы в ледовом покрове бурятся лунки, предназначенные для формирования подледной части. В результате формируются виртуальные барьеры в подледной акватории, при пересечении которых или при приближении к которым малошумные подводные объекты обнаруживаются с высокой степенью точности.

Отметим, что сформированная ледовая платформа из вмороженных геогидроакустических буев может решать задачи двойного назначения: находясь в режиме «боевого дежурства», помимо обеспечения военной безопасности РФ,

она одновременно может проводить разведку и мониторинг месторождений углеводородов на шельфе северных морей в любое время года. При этом зондирование морского дна осуществляется по программе, согласованной с дрейфом льдины, на которой развернута геогидроакустическая платформа.

На основе сформулированного облика перспективной системы мониторинга арктической зоны РФ можно выделить следующие технические требования, которым должны удовлетворять разрабатываемые инновационные геогидроакустические платформы ледового класса:

- возможность записи в памяти и передачи данных в реальном времени с разрешением в вертикальной плоскости с высокой точностью (не более чем 10 м) до предельных глубин в течение одного года;
- возможность их доставки легкими самолетами и вертолетами, а также установки через бурильное отверстие во льду;
- возможность использования дополнительных сменных модулей и боевых систем в процессе эксплуатации.

В перспективе новое поколение площадных антенн ледового класса должно стать ключевым элементом глобальной системы наблюдений в Арктике, обеспечивающей:

- контроль доступа к северным границам РФ в режиме, близком к режиму ре-

ального времени, в условиях ледовой обстановки на значительных расстояниях от береговой линии, где использование кабельных систем наблюдений с донными и закоренными приемо-передающими модулями практически невозможно;

- ретрансляцию данных от автономных подводных аппаратов, автономных донных систем наблюдений через спутниковые каналы связи на береговой командный пункт, в том числе для оперативной передачи целеуказания и для навигации подводных объектов;

- непрерывный сбор информации о состоянии водного слоя, льда и прилегающего слоя атмосферы в местах расположения рассматриваемых систем наблюдений для решения широкого класса междисциплинарных задач.

В Арктике системы наблюдений ледового класса являются ключевым элементом как существующих, так и разрабатываемых средств и методов организации мониторинга покрытых льдом акваторий для оборонных, научно-исследовательских и геологических целей. При этом разработка современных систем ледового класса должна быть основана на интегрированном использовании геогидроакустических средств освещения подводной обстановки, систем мониторинга состояния льда и атмосферы, а также систем приема-передачи данных через спутниковые каналы связи.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Дмитриченко В.П., Преснов Д.А., Руденко О.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Сухопаров П.Д., Тихоцкий С.А., Шуруп А.С. Способ поиска полезных ископаемых на шельфе морей, покрытых льдом // Патент России № 2646528. – Бюл. № 7. – 2018.
2. Агафонов В.М., Груздев П.Д., Дмитриченко В.П., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Сухопаров П.Д. Совершенствование конструктивных элементов векторно-фазовых гидроакустических приемников инфразвукового диапазона. // Труды XIII всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб., 2016.
3. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмического приемника с отрицательной обратной связью // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 5-18.
4. Agafonov V.M., Neeshpara A.V., Shabalina A.S. Electrochemical Seismometers of Linear and Angular Motion. Encyclopedia of Earthquake Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015.
5. Агафонов В.М., Авдохина С.Ю., Егоров Е.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. Низкочастотный векторный акустический приемник // Патент России № 2650839. – Бюл. № 11. – 2018.
6. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С., Лиходеев Д.В., Агафонов В.М. Геогидроакустический шумовой мониторинг подледных акваторий северных морей // Наука и технологические разработки. – 2017. – Т. 96, № 3. – С. 31-46.



### СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЛУБИННЫХ СТРУКТУР МОРСКОЙ СРЕДЫ ПРИ НАЛИЧИИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Изложены новые научные результаты теоретических и экспериментальных исследований геоакустических волновых процессов в слоистой гидрофизической среде типа «ледовый покров – водный слой – морское дно», проведенных с привлечением инновационных технологий, включая томографические оценки параметров скоростных неоднородностей по шумам, зарегистрированным на границах исследуемого района моря. Представлены результаты анализа процессов затухания изгибно-гравитационных волн, распространяющихся вдоль границ раздела слоистой гидрофизической среды. Изучены дисперсия и превращения волновых структур в другие типы волн, распространяющихся вдоль морского дна.

#### ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Поверхностные волны представляют особый интерес как для практических, так и для теоретических исследований, так как могут использоваться для создания неинвазивных технологий оценки значений параметров среды в различных масштабах от промышленного ультразвукового контроля дефектов материалов до сейсмологического анализа, позволяющего оценить структуру коры и верхней мантии Земли [1, 2]. Основной целью настоящей работы является исследование возможности применения поверхностных волн рэлеевского типа для задач геоакустического мониторинга глубинных структур с упрощенными требованиями к технической стороне проводимых исследований. Как правило, практическая реализация тех или иных методов глубинного зондирования слоистых сред требует использования мощных источников сейсмоакустического сигнала, что в общем случае заметно увеличивает стоимость и усложняет техническую реализацию этих методов. Серьезное упрощение экспериментальных работ в море, направленных на развитие новых геоакустических технологий мониторинга, возможно, если в качестве источника полезного сигнала исполь-

зовать не активное излучение, а микросейсмический шум, являющийся естественным источником информации о наличии локальных неоднородных образований в слоистой геофизической среде.

Известно, что функция взаимной корреляции микросейсмического шума, зарегистрированного разнесенными в пространстве отдельными геоакустическими информационно-измерительными системами, при достаточном времени накопления имеет два максимума, симметричных относительно нулевой временной задержки. Один из этих максимумов соответствует времени распространения поверхностных волн между точками наблюдения, как если бы в одной точке находился источник, возбуждающий эти волны, а в другой – приемник; второй максимум функции взаимной корреляции соответствует противоположному направлению распространения сигнала между приемниками. В итоге корреляционная обработка микросейсмического шума дает возможность реализовать методы сейсмоакустического мониторинга глубинных структур, основанные, например, на оценке дисперсионных зависимостей (то есть частотных зависимостей фазовых и групповых скоростей) поверхностных волн.

### УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ. РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ

Среди наиболее ярких современных экспериментальных результатов, полученных в данном направлении исследований, следует выделить работу [3], где приведена обработка сигналов с более чем 2000 датчиков (регистрирующих три компонента скорости и давление), расположенных на дне Северного моря и покрывающих территорию размером 45 квадратных километров. В результате корреляционной обработки зарегистрированных шумовых полей было восстановлено глубинное распределение скоростей поперечных волн и околнурена область нефтяного пласта. Такой же подход с успехом может быть использован при работе с поверхности ледовых полей в арктических условиях, когда необходимо выделить протяженную неоднородность в морской среде подо льдами.

Ниже будет рассмотрен разработанный авторами алгоритм томографического восстановления скоростного разреза геологической среды на основе информации о временах распространения поверхностных волн, полученных с использованием данных о функции взаимной корреляции шумового поля для относительно узких частотных диапазонов. Сегодня хорошо известно, что основная часть геоакустической энергии, создаваемой различного рода источниками в слоистой геофизической среде, сосредоточена в поверхностных волновых структурах.

В числе изученных волновых структур на первое место выходят волны рэлеевского типа [4]. В статье [5] показано, что волны рэлеевского типа, распространяющиеся вдоль донной поверхности, наиболее чувствительны к неоднородностям среды, расположенным на глубине, соответствующей примерно половине длины волны рассматриваемого частотного диапазона. В итоге изменение частоты регистрируемого сигнала, сформированного поверхностными волнами рэлеевского типа, дает возможность послынного томографического восстановления глубинной структуры исследуемой области.

На первом этапе работы было проведено моделирование решения прямой задачи распространения поверхностных волн в сложной геологической среде. Решение полного волнового уравнения в аналитическом виде для неоднородной упругой среды представляет значительные трудности, поэтому его анализ производится, как правило, на упрощенных моделях [6], либо при помощи высокопроизводительных вычислительных систем [7]. В качестве модели рассматриваемой вертикально неоднородной среды была выбрана система, состоящая из плоскопараллельных изотропных слоев, а расчет зависимости фазовой скорости от частоты для такой среды проводился на основе матричного метода Томсона-Хаскелла [8]. Вид дисперсионных зависимостей определяется параметрами, которые характеризуют слои (скоростей продольных и поперечных волн, плотностей), а также зависит от количества и толщины слоев. Возмущение параметров среды относительно их фонового значения приводит к изменению дисперсионных зависимостей поверхностных волн, что, в свою очередь, влияет на характеристики принимаемых сигналов, например приводит к возмущениям времен распространения сигналов между точками наблюдения в заданном частотном интервале.

Решение обратной задачи позволяет по измеренным вариациям времен распространения сигналов оценить возмущения значений параметров среды. Изначально были заданы параметры трехслойной модели среды, представленные в таблице 1, которые в дальнейшем будут характеризовать невозмущенную фоновую среду. Интерес представляет исследование фундаментальной моды, обладающей наибольшей энергией и, следовательно, проще выделяемой на сейсмической записи. Дисперсионные зависимости фазовых и групповых скоростей, полученные для фундаментальной

моды при фоновых параметрах среды, представленные на рисунке 1а, где групповая скорость рассчитана с использованием значе-

ний фазовой скорости, полученных для разных частот на основе матричного метода Томсона-Хаскелла [8].

Таблица 1 – Параметры фоновой невозмущенной среды

Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с	Плотность, г/м <sup>3</sup>	Толщина, м
1810	1000	1000	1500
1620	1080	1000	300
2440	1370	1110	∞

Для учета неоднородностей среды в горизонтальной плоскости рассчитывались дисперсионные зависимости в узлах заранее заданной прямоугольной сетки (см. рисунок 1б, где  $c_{ii}$  – скорость продольных волн в  $i$ -ом слое,  $c_{ii}$  – скорость поперечных волн в  $i$ -ом слое,  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го слоя,  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя). В каждом узле

сетки  $(x, y)$  по вертикальной координате  $z$  среда является плоскостной, что позволяет рассчитать фазовые и групповые скорости тем же способом, как и в случае фоновой среды. При этом параметры слоев в различных узлах сетки различны, что и позволяет приближенно описать неоднородности параметров среды в горизонтальной плоскости.

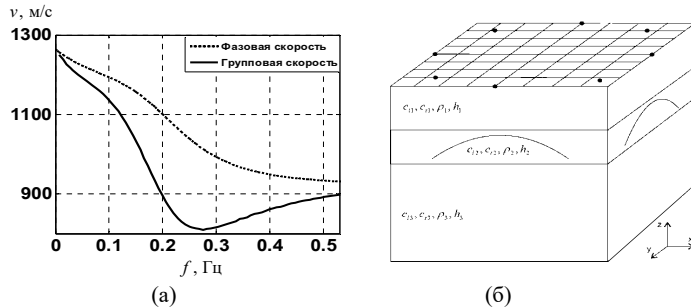


Рисунок 1 – Характерный вид дисперсионных кривых (а) и модель неоднородной среды (б), где точками на поверхности условно изображены сейсмоприемники, регистрирующие поверхностные волны

Расчет дисперсионных зависимостей производился в предположении, что упругая среда представляет собой два слоя на полупространстве, а характеристики среднего слоя (скорости продольных и поперечных волн, плотность) изменяются в горизонтальных координатах по закону двумерного гауссова распределения от значений, указанных в таблице 1 до максимального значения, превышающего фоновое на 100 м/с.

В итоге были получены данные о групповых скоростях поверхностных волн  $v(x, y, f)$  для большого количества точек горизонтальной сетки  $(x, y)$  на различных частотах  $f$ . Выбор заданной частоты  $f = f'$  позволяет получить двумерные карты распределения групповых скоростей в горизонтальной плоскости  $v(x, y, f = f')$ . Далее на основе  $v(x, y, f = f')$  рассчитываются времена распространения поверхностных волн

между всеми  $k$ -ми и  $n$ -ми датчиками, расположенными на поверхности исследуемой области. (Предполагается, что полученные оценки  $t_{kn}$  соответствуют временным задержкам, оцененным на основе экспериментальных данных, на которых наблюдаются максимумы функции взаимной корреляции микросейсмического шума, полученной для достаточно узкополосного шумового сигнала с центральной частотой  $f'$ .) После этого рассчитываются времена  $t_{kn}^{(0)}$ , соответствующие фоновой невозмущенной среде, характеризующей групповой скоростью  $v_0(x, y, f) \equiv v_0(f)$ .

Полученные в итоге возмущения времен  $\Delta t_{kn} = t_{kn} - t_{kn}^{(0)}$  являются исходными для решения томографической задачи восстановления неоднородностей групповых скоростей  $\Delta v(x, y, f') = v(x, y, f') - v_0(f')$  на заданной частоте  $f = f'$ , то есть на заданной глубине примерно равной половине длины волны на этой частоте.

Детальное описание метода решения томографической задачи приведено в следующем разделе с пояснениями основных этапов численного моделирования решения прямой задачи.

### ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА. ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ

При восстановлении  $\Delta v(x, y) = v(x, y) - v_0$  (в дальнейшем для сокращения записей зависимость  $f'$  опущена) по данным  $\Delta t_i$  (здесь и далее вместо двух индексного обозначения  $k$ -го и  $n$ -го датчиков для сокращения записей будет использоваться обобщенный индекс  $i$ , соответствующий этой паре датчиков) используется наличие близкой к линейной зависимости между возмущениями времен  $\Delta t_i$  и ве-

личины неоднородности  $\Delta v(x, y)$ , присутствие которой в исследуемой области и вызывает временные задержки  $\Delta t_i$ :

$$\Delta t_i \approx - \int_{L_i^0} \frac{\Delta v(x, y) dl^0}{v_0^2(x, y)}, \quad (1)$$

где интегрирование ведется вдоль траектории  $L_i^0$  луча, соединяющего рассматриваемую  $i$ -ю пару датчиков в плоскости  $(x, y)$  для случая невозмущенной среды. Перебор всех пар датчиков позволяет получить набор измерений  $\Delta t_i$ , которые являются исходными данными для нахождения неизвестных  $\Delta v(x, y)$ . Один из способов решения интегральных уравнений, определенных для различных пар  $i$ , основан на их дискретизации. В этом случае восстанавливаемые характеристики среды представляются в виде линейной комбинации конечного числа базисных функций  $\Theta_j(r)$ ,

$j = \overline{1, J}$ . Было показано [9], что обычные требования, накладываемые на базис, такие как его ортогональность и безызбыточная полнота, могут быть ослаблены в задачах томографического типа. Так, например, в алгоритме, описываемом далее, ортогональность базисных элементов не используется вовсе, но требуется, чтобы используемый базис обладал полнотой, достаточной для восстановления неоднородностей с требуемой точностью. Разложение томографируемой неоднородности  $\Delta v(x, y)$  по базису  $\Theta_j(r)$  представляется в виде:

$$\Delta v(x, y) = \sum_{j=1}^J x_j \Theta_j(x, y). \quad (2)$$

В итоге система уравнений (2), определенная для всех  $i$ -ых пар датчиков, принимает вид:

$$A X = \Delta T, \quad (3)$$

где элементы матрицы возмущений  $A$  имеют вид  $A_{ij} = -\int_{L_i^0} \frac{\Theta_j(x, y)}{v_0^2(x, y)} dl^0$  и соответствуют возмущениям времен распространения поверхностных волн между  $i$ -ой парой датчиков при наличии в исследуемой области неоднородности в виде базисной функции  $\Theta_j(x, y)$ .

Столбец  $\Delta T$  состоит из значений временных задержек сигналов  $\Delta t_i$ , а вектор  $X$  – из неизвестных коэффициентов  $x_j$  разложения искомой функции  $\Delta v(x, y)$  по базису  $\Theta_j(r)$ . Решение системы (3) может быть найдено различными способами, учитываемыми в том числе априорную информацию различного вида, например о гладкости восстанавливаемых функций или их априори известных значениях в заданных точках исследуемой области. В настоящей работе используется МНК-решение, регуляризованное в простейшем случае путем добавления к  $A^+ A$  единичной матрицы  $E$  с весовым коэффициентом  $\gamma^2$ , и имеет следующий вид:

$$\hat{X} = (A^+ A + \gamma^2 E)^{-1} A^+ \Delta T, \quad (4)$$

где знак «+» обозначает эрмитово сопряжение, а регулярирующий коэффициент  $\gamma^2$  контролирует требования минимизации нормы решения по сравнению с нормой невязки. Значения  $\hat{X} = \{\hat{x}_j\}$ , полученные из (4), позволяют оценить искомое распределение  $\Delta v(x, y)$  в виде

$$\Delta \hat{v}(x, y) = \sum_{j=1}^J \hat{x}_j \Theta_j(x, y).$$

Таким образом, исходная задача томографического восстановления возмущения  $\Delta v(x, y)$  по набору данных измерений  $\Delta t_i$  сводятся к решению системы линейных

алгебраических уравнений (3) относительно неизвестных коэффициентов  $x_j$  разложения функций  $\Delta v(x, y)$  по выбранному базису  $\Theta_j(x, y)$ .

Следует отметить, что в случае существенного отклонения от линейной зависимости, ожидаемого в условиях реального эксперимента, возможно привлечение итерационных процедур для уточнения получаемых оценок  $\Delta v(x, y)$ .

Принципиальным при решении той или иной задачи томографирования является выбор базисных функций  $\Theta_j(x, y)$ , позволяющих достаточно точно описать распределения восстанавливаемых параметров среды, при этом использование базисных функций не должно накладывать дополнительные математические требования и алгоритмические сложности на процесс построения матрицы возмущений  $A$ .

Ниже при восстановлении неоднородностей используется так называемый полосчатый базис [9], изначально разработанный для решения задач томографии океана [10]. Этот базис представляет собой набор  $P$  параллельных полос, равномерно покрывающих область томографирования и поворачиваемых с равным угловым шагом  $\pi/U$  в интервале  $(0, \pi)$ ,  $U$  – количество углов поворота. Базисные функции  $\Theta_j(x, y)$  задаются внутри этих полос, где их значения полагаются постоянными. Использование полосчатого базиса имеет ряд преимуществ по сравнению с «традиционными» базисами (типа непересекающихся квадратов, плотно покрывающих рассматриваемый регион), существенно смягчая сложность математической стороны проблемы: не требуются строгая полнота и ортогональность базиса, проще становится построение матрицы возмущений [11].

При решении томографической задачи в исследуемой области задается фоновое значение групповой скорости фундаментальной моды  $v_0(f')$  на рассматриваемой

частоте  $f'$  (не зависящее от координат  $(x, y)$ :  $v_0(x, y, f') = v_0(f')$ ), и для каждой  $i$ -ой пары датчиков рассчитываются времена распространения, соответствующие невозмущенным параметрам среды:  $t_i^{(0)} = r_i/v_0$ , здесь  $r_i$  – расстояние между рассматриваемой парой датчиков; зависимость от  $f'$  для сокращения записей убрана. Далее рассчитываются элементы матрицы возмущений  $A$ , представляющие собой временные задержки  $\Delta t_{ij}$ , вызванные поочередным введением в исследуемую область возмущений среды в виде базисных функций  $v_0(f') + \Theta_j(x, y)$ . В силу того что базисные функции представляют собой полосы, то расчет  $\Delta t_{ij}$  сводится лишь к применению закона Снеллиуса для учета рефракции на границах фиксированной базисной полосы. Расчет элементов правой части  $\Delta T$  системы (4) более трудоемкий, так как восстанавливаемая в исследуемой области неоднородность имеет более сложный вид, чем отдельная полоса. В этом случае решается уравнение эйконала для двумерной неоднородной среды, характеризующейся распределением скорости  $v(x, y) = v_0 + \Delta v(x, y)$ , что позволяет определить траектории лучей  $L_i$ , соединяющих  $i$ -е пары датчиков в плоскости  $(x, y)$  для возмущенной среды. После этого время распространения поверхностной волны находится интегрированием по найденной траектории  $L_i$ :  $t_i = \int_{L_i} \frac{dl}{v(x, y)}$ , где  $dl$  – элемент траектории  $L_i$ . В итоге элементы столбца  $\Delta T$  рассчитываются в виде  $\Delta t_i = t_i - t_i^{(0)}$ . После этого рассматривается решение (4) системы (3), что позволяет оценить коэффициенты разложения  $x_j$  по рассматриваемому базису (2).

Дальнейшая оценка неоднородности  $\Delta \hat{v}(x, y)$  в заданной точке  $(x, y)$  (на границе, соответствующей примерно половине длины волны на рассматриваемой частоте  $f'$ ) осуществляется путем суммирования (2) базисных функций  $\Theta_j(x, y)$  с весами, равными значениям восстановленных коэффициентов  $\hat{x}_j$ .

Итоговая оценка  $\hat{v}(x, y)$  искомого распределения  $v(x, y)$  находится в виде  $\hat{v}(x, y) = v_0 + \Delta \hat{v}(x, y)$ .

Для улучшения качества восстановления можно воспользоваться априорной информацией об искомых неоднородностях: например, пространственный спектр восстановленной неоднородности может быть скорректирован путем фильтрации.

Пример результатов восстановления по описанному выше алгоритму представлен на рисунке 2, где в подписях указаны параметры решаемой задачи. Для оценки точности полученных оценок рассчитывались невязки по решению ( $\eta_r$ ) и по правой части ( $\eta_m$ ):

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\sum_{d,l} |\Delta v(x_d, y_l) - \Delta \hat{v}(x_d, y_l)|^2}{\sum_{d,l} |\Delta v(x_d, y_l)|^2}}, \quad \eta_r = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} |\Delta T_i - \Delta \hat{T}_i|^2}{\sum_{i,j} |\Delta T_i|^2}}, \quad (5)$$

где  $\Delta v(x, y)$  и  $\Delta \hat{v}(x, y)$  – истинное и восстановленное значения возмущения групповой скорости в данной точке  $(x, y)$ , характеризующей при дискретизации индексами  $(d, l)$ ;  $\Delta \hat{T}_i$  – элементы вектора  $\Delta \hat{T}$ , получаемого в качестве правой части системы уравнений. При подстановке в эту систему решения  $\hat{X} \Delta T_i$  – элементы вектор-столбца возмущений акустического поля  $\Delta T$ , вносимых истинной неоднородностью.

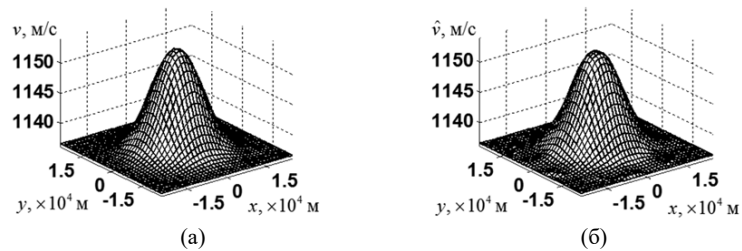


Рисунок 2 – Исходное распределение групповой скорости поверхностной волны  $v(x, y)$  (а) в исследуемой области на частоте 0.2 Гц и результат восстановления этого распределения  $\hat{v}(x, y)$  (б) при использовании полосчатого базиса, образованного  $P = 8$  полосами, поворачиваемыми под  $U = 15$  углами (возмущение групповой скорости в базисной полосе полагалось равным 8 м/с, количество источников-приемников – 11); величина невязки по решению составила  $\eta_v = 0.034$ , невязки по правой части –  $\eta_r = 0.003$

Как видно на рисунке 2, удалось восстановить с приемлемой точностью пиковое значение неоднородности  $\Delta v(x, y)$ , ее характерный масштаб и положение в исследуемой области.

Аналогичные результаты получаются и для других значений частот  $f'$ . В итоге перебор различных частот позволяет оценить значения двумерных карт групповых скоростей в неоднородной среде на основе временных задержек  $\Delta t_i$ , получив тем самым значения дисперсионных зависимостей  $\hat{v}(x, y, f)$  для каждого узла рассматриваемой прямоугольной сетки  $(x, y)$ .

Последний шаг обсуждаемого подхода, заключающийся в оценке характеристик среды  $c_{ii}$ ,  $c_{ij}$ ,  $\rho_i$ ,  $h_i$  по восстановленным значениям  $\hat{v}(x, y, f)$ , может быть реализован, например, на основе известных процедур геоинверсии [12].

Для экспериментальной апробации рассматриваемого томографического подхода была использована система, состоящая из 70 широкополосных сейсмических датчиков, использовавшихся при проведении эксперимента Plume Lithosphere Undersea

Melt [13]. Эти данные представляют интерес для проводимого исследования, поскольку указанная сеть сейсмометров покрывает Гавайские острова, имеющие вулканическое происхождение, а значит, под ними заведомо имеются контрастные области, обусловленные вулканическими процессами в этом регионе, которые могут стать объектами томографирования. Кроме того, вызывает интерес апробация обсуждаемого подхода при использовании данных, зарегистрированных датчиками, расположенными на дне океана. В случае успешной апробации разрабатываемые подходы могут быть обобщены на случай геоакустической томографии на волнах поверхностного типа при наличии водного слоя, что является весьма актуальным в последнее время в связи с активным освоением шельфовых зон.

Как было показано выше, для восстановления неоднородностей геологической среды в обсуждаемой томографической схеме требуется использовать приемники шумового сигнала, установленные по периметру исследуемой области. В итоге были отобраны 10 сейсмостанций, расположение которых изображено на рисунке 3а треугольниками черного цвета.

На первом этапе решалась задача определения времен распространений поверхностных сейсмических волн между каждой из пар станций. Для этого вычисля-

лась функция взаимной корреляции для суточных временных рядов по шумовым данным, накопленным за год, и затем полученные результаты усреднялись.

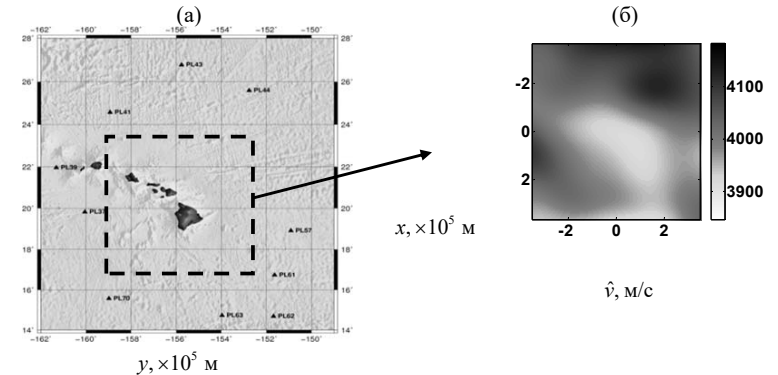


Рисунок 3 – Распределение сейсмических датчиков на дне океана вблизи о. Гавайи (а) из эксперимента IRISDMC [Laske et al., 2009], данные с которых использовались при томографическом восстановлении (пунктиром выделена граница исследуемого региона). Результаты этого восстановления для глубины ~ 16 км представлены в выноске (б) к рисунку

Для получения достоверных, симметричных относительно нулевой задержки корреляционных пиков проводилась предварительная обработка записей, в которую, помимо стандартных процедур – учета калибровочной кривой прибора и полосовой фильтрации, входило также удаление записей землетрясений, нормализация амплитуды сигнала и обеление спектра.

Такая обработка проводилась на основе процедур, подробно изложенных в [14, 15]. На данном этапе проводимых исследований удалось оценить времена распространений сигналов между рассматриваемыми сейсмометрами из функции взаимной корреляции шумового сигнала в диапазоне частот 0.045–0.055 Гц. Эти времена использовались далее для построения обсуждаемой в настоящей работе томографической схемы, при этом рассматривались те же параметры полосчатого базиса, что и при численном моделировании ранее. Полученные результаты восстановления представлены на

рисунке 3б. Учитывая, что неоднородность находится на глубине половины длины волны, можно приближенно говорить, что эти результаты относятся к глубине порядка 16 км. Видно, что в исследуемом регионе выделяется область с пониженной скоростью распространения сейсмических волн под островами, что можно интерпретировать как магматическую породу. Двумерные результаты восстановления, полученные для разных частотных диапазонов в рамках описанного в настоящей работе подхода, могут использоваться при синтезе трехмерных изображений неоднородностей, в данном случае гавайского плюма, что, в свою очередь, может позволить оценить его объем и упругие свойства.

## ВЫВОДЫ

В работе предложена схема геоакустической томографии на основе анализа времен распространения поверхностных волн рэле-вского типа, полученных для различных до-

статочности узких частотных диапазонов. Предполагается, что в условиях реального эксперимента подобные данные могут быть оценены на основе анализа функции взаимной корреляции микросейсмического шума. В отличие от известных авторам схем пассивного томографического мониторинга глубинных структур, в настоящей работе используются лишь приемники, расположенные на границе исследуемой области, что заметно снижает требования к технической стороне проводимых исследований. На модельных данных, а также на данных натурного эксперимента показаны принципиальные возможности обсуждаемого подхода.

К основным ограничениям рассматриваемой схемы относится требование достоверной оценки времен распространения сигналов между точками приема на основе анализа функции взаимной корреляции шумовых полей. Это в большинстве практических случаев сталкивается с определенными трудностями, связанными в первую очередь с ограниченным временем накопления сигнала, что не всегда позволяет получить требуемые значения отношения сигнал/помеха при корреляционной обработке регистрируемых сигналов. В дальнейшем основное внимание предполагается уделить более детальному исследованию этого вопроса для различных возможных постановок эксперимента и развития специализированных прикладных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев Г.А. Сейсмический шум. – М.: Наука и образование, 2014. – 271 с.
2. Яновская Т.Б., Лыскова Е.Л. Скоростное строение верхней мантии Европы по результатам шумовой поверхностно-волновой томографии // Физика Земли. – 2013. – № 5. – С. 3-11.
3. Mordret A., Shapiro N.M., Singh S.S., Roux P., Barkved O.I. Helmholtz tomography of ambient noise surface wave data to estimate Scholte wave phase velocity at Valhall Life of the Field // Geophysics. 2013. V. 78. N. 2. P. WA99-WA109.
4. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. В 2-х т. – М.: Мир, 1983.
5. Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. – 2008. – № 7. – С. 66-84.
6. Собисевич А.Л., Разин А.В. Геоакустика слоистых сред. – М.: ИФЗ РАН, 2012. – 210 с.
7. Квасов И.Е., Петров И.Б. Численное моделирование волновых процессов в геологических средах в задачах сейсморазведки с помощью высокопроизводительных ЭВМ // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2012. – Т. 52, № 2. – С. 330.
8. Ke G., Dong H., Kristensen A., Thompson M. Modified Thomson–Haskell Matrix Methods for Surface-Wave Dispersion-Curve Calculation and Their Accelerated Root-Searching Schemes // Bulletin of the Seismological Society of America. 2011. Vol. 101.No. 4. P. 1692-1703.
9. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Роль выбора базисных функций в задачах акустической томографии океана // Акуст. журн. – 2007. – Т. 53, № 6. – С. 791-808.
10. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Трехмерная модель томографического восстановления океанических неоднородностей при неизвестном расположении антенн // Акуст. журн. – 2011. – Т. 57, № 3. – С. 348-363.
11. Буров В.А., Попов А.Ю., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Акустическая томография океана при использовании нестандартного представления рефракционных неоднородностей // Акуст. журн. – 2005. – Т. 51, № 5. – С. 602-613.
12. Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле (под ред. Кейлис-Борок). – М.: Наука, 1987. – 279 с.
13. Lasko G., Collins J.A., Wolfe C.J., Solomon S.C., Detrick R.S., Orcutt J.A., Bercovici D., Hauri E.H. Probing the Hawaiian hot spot with new ocean bottom instruments // EOS Trans. AGU, 90, 2009. P. 362-363.
14. Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., Moschetti M.P., Shapiro N.M., Yang Y. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // Geophys. J. Int. 2007. V. 169. P. 1239-1260.
15. Королева Т.Ю., Яновская Т.Б., Патрушева С.С. Использование сейсмического шума для определения структуры верхней толщи Земли // Физика Земли. – 2009. – № 5. – С. 3-14.

УДК 530.343, 534.11

*П.Д. ГРУЗДЕВ, к.ф.-м.н. Р.А. ЖОСТКОВ,  
к.ф.-м.н. Д.А. ПРЕСНОВ, к.ф.-м.н. Д.В. ЛИХОДЕЕВ*

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА МОРСКОЙ СРЕДЫ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

Проведены теоретические и экспериментальные исследования поверхностных геоакустических волн, распространяющихся в слоистой среде типа «литосфера – гидросфера – ледовый покров». Выделены основные типы поверхностных волн, включая фундаментальную моду, распространяющуюся преимущественно вдоль границы морского дна и водного слоя, и изгибную моду, сосредоточенную в ледовом покрове. Выполнены оценки определяющих параметров среды на фазовые скорости поверхностных волновых структур. Осуществлено разделение фундаментальной моды и изгибной волны в процессе анализа экспериментальных данных, полученных в сложных ледовых условиях.

#### ВВЕДЕНИЕ

Проведенные теоретические и экспериментальные полевые работы подтвердили острую необходимость дальнейших исследований геоакустических волн, при помощи которых можно получать наиболее достоверную информацию о структуре слоистых сред северных морей при наличии ледового покрова. Полученные в процессе выполнения работ новые научные результаты уже востребованы при решении актуальных задач по освоению северных территорий.

Крайне эффективными для этой цели являются данные о поверхностных акустических волнах (ПАВ), которые формируются вблизи границ раздела неоднородных слоистых структур арктических морей. Это объясняется тем, что они, в отличие от объемных волн, распространяются только в горизонтальных направлениях, что приводит к их более медленному затуханию и, как следствие, преобладанию в сейсмоакустическом сигнале, регистрируемом на поверхности Земли.

Во время проведения полевых и морских работ нам удавалось с высокой точностью выделять ПАВ на фоне помехи. Кроме того, при обработке данных допу-

стимо использование не трехмерной, а двумерной томографии, что значительно упрощает расчеты.

Исследование фундаментальных свойств ПАВ приобретает особую важность в связи с острыми проблемами, которые возникают при мониторинге обширных подводных акваторий, покрытых сплошными ледовыми полями, и активном освоении месторождений полезных ископаемых на шельфе Северного Ледовитого океана. С другой стороны, покрытие льдом северные моря – это трудноконтролируемая акватория с точки зрения обнаружения подводных средств вероятных противников.

Решение многих назревших задач геоакустики слоистых сред неразрывно связано с прогрессивными технологиями двойного назначения, в число которых входит исследование волновых процессов и энергетических взаимодействий в системе «литосфера – гидросфера – ледовый покров».

#### МОДЕЛЬ СРЕДЫ

Определяющее значение для условий генерации различных типов ПАВ в системе «литосфера – гидросфера – ледовый по-



кров» имеет структура «водный слой – ледовый покров». Тонкая структура морского дна влияет скорее на характеристики распространяющихся волн, а не на генерацию новых мод, поэтому целесообразно рассмотреть упрощенную математическую модель. Согласно такой модели, среда представляет собой систему из двух плоских слоев (упругого и жидкого), лежащих на упругом полупространстве (рисунок 1).

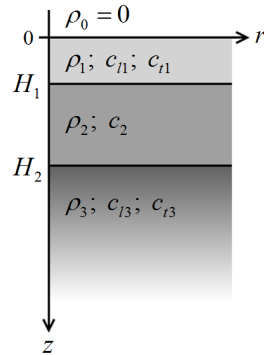


Рисунок 1 – Модель среды

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2} - c_{l1}^2 \Delta \varphi_1 &= 0, & \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial t^2} - c_2^2 \Delta \varphi_2 &= 0, & \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial t^2} - c_{l3}^2 \Delta \varphi_3 &= 0, \\ \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2} - c_{l1}^2 \left( \Delta \psi_1 - \frac{\psi_1}{r^2} \right) &= 0, & \frac{\partial^2 \psi_3}{\partial t^2} - c_{l3}^2 \left( \Delta \psi_3 - \frac{\psi_3}{r^2} \right) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zz1}|_{z=0} &= 0, & \sigma_{zr1}|_{z=-H_1} &= 0, & \sigma_{zr3}|_{z=-H_2} &= 0, \\ \sigma_{zr1}|_{z=0} &= 0, & (\sigma_{zz1} - \sigma_{zz2})|_{z=-H_1} &= 0, & (\sigma_{zz2} - \sigma_{zz3})|_{z=-H_2} &= 0, \\ (u_{z1} - u_{z1})|_{z=-H_1} &= 0, & (u_{z2} - u_{z3})|_{z=-H_2} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $c$  – скорости распространения продольных и поперечных волн,  $\rho$  – плотность,  $u$  и  $\sigma$  – компоненты смещения и тензора напряжения.

Из уравнений теории упругости, записанных в цилиндрических координатах, можно получить волновые уравнения (1) для потенциалов  $\varphi$ ,  $\psi$  в упругом слое, в жидкости  $\varphi_0$  и в твердом полупространстве  $\varphi'$ ,  $\psi'$ , которые вместе с граничными условиями (2) и условием излучения полностью определяют математическую постановку задачи.

Исходя из приведенной системы уравнений можно вывести дисперсионное уравнение для поверхностных волн:

$$\begin{aligned} \omega^4 \frac{\rho_1 \rho_2}{\mu_2^2} q_1 \left[ \omega^4 \frac{\rho_2 \rho_3}{\mu_3^2} q_3 \sin q_2 \Delta H + i q_2 \left( (k^2 - s_3^2)^2 + 4\alpha_3 \alpha_3 k^2 \right) \cos q_2 \Delta H \right] \times \\ \times \left[ (k^2 - s_1^2)^2 \cos q_1 H_1 \sin s_1 H_1 + 4q_1 s_1 k^2 \sin q_1 H_1 \cos s_1 H_1 \right] + \\ + q_2 \left[ \omega^4 \frac{\rho_2 \rho_3}{\mu_3^2} q_3 \cos q_2 \Delta H - i q_2 \left( (k^2 - s_3^2)^2 + 4q_3 s_3 k^2 \right) \sin q_2 \Delta H \right] \times \\ \times \left[ 8q_1 s_1 k^2 (k^2 - s_1^2)^2 (1 - \cos q_1 H_1 \cos s_1 H_1) + \left( (k^2 - s_1^2)^4 + 16k^4 q_1^2 s_1^2 \right) \sin q_1 H_1 \sin s_1 H_1 \right], \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\omega$  – круговая частота поверхностной волны,  $\alpha$ ,  $s$ ,  $q$  – функции круговой частоты и скоростей продольных и поперечных волн в слоях, которые для краткости здесь не приводятся (более подробно см. [1]).

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОСТРОЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Численное решение полученного дисперсионного уравнения для случая, соответствующего реальным параметрам моря с ледовым покровом  $c_0 < c_{l1} < c_{l1}$ , представлено на рисунке 2.

Рассмотрение других случаев приводит к выделению еще нескольких типов волн, однако здесь они не приводятся, т. к.

не соответствуют параметрам реальных геофизических объектов.

Определяющим условием практического использования дисперсионных кривых, которые удается получить при обработке экспериментальных данных, является их чувствительность к изменению параметров среды. Анализ этих данных приводит к ряду новых научных результатов.

Так, например, толщина льда может представлять интерес не только в задачах глобального экологического мониторинга, но и при оценке возможности доставки грузов по льду, в то время как уточнение строения дна интересно при решении задач поиска залежей углеводородов на шельфе Северных морей.

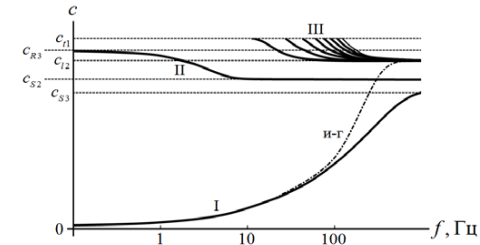


Рисунок 2 – Дисперсионные зависимости, соответствующие случаю  $c_0 < c_{l1} < c_{l1}$ .

На рисунке 2 сплошными линиями обозначены: I – изгибная волна, II – «фундаментальная» мода, III – гидроакустические моды. Пунктирные линии соответствуют асимптотикам:  $c_{R3}$  – скорость рэлевской волны, распространяющейся вдоль

границы упругого полупространства,  $c_{S2}$  и  $c_{S3}$  – скорости волн Стоунли на границе «вода – лед» и «вода – дно» соответственно. Штрихпунктирная линия соответствует изгибно-гравитационной волне [2].

Всегда следует обращать внимание на низкоскоростную изгибную волну, которая существует на всех частотах и распространяется при любом соотношении фазовых скоростей продольных и поперечных волн в среде. Фазовая скорость этой волны критична к выбору толщины ледового слоя. Эта волна несет информацию о характеристиках льда, прежде всего толщине и температуре (т. к. скоростные характеристики зависят от температуры).

Чувствительность изгибной волны к характеристикам льда подтверждается, например, зависимостью фазовой скорости этой волны от толщины ледового слоя (ри-

сунк 2), чего не наблюдается для фундаментальной моды.

С точки зрения задач геофизики и освещения подводной обстановки наибольший интерес представляет именно фундаментальная мода, энергия которой сосредоточена в морском дне и в водном слое. Она несет информацию о земных недрах. Кроме того, ее изучение позволяет получать полезную информацию о состоянии водного слоя и о наличии в нем контрастных движущихся объектов. Это фундаментальное свойство подтверждается изменчивой структурой фазовой скорости этой волны к параметрам дна и водного слоя (рисунки 3-5).

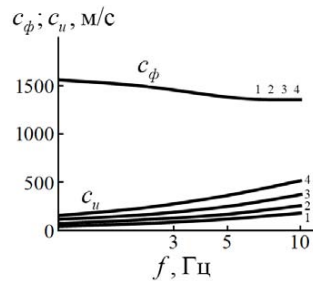


Рисунок 3 – Зависимость скоростей фундаментальной  $c_\phi$  и изгибной  $c_u$  волн от частоты для разной толщины льда  $H_i$ : 1 – 1 м, 2 – 2 м, 3 – 4 м, 4 – 8 м

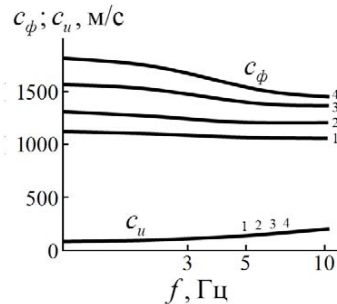


Рисунок 4 – Частотные зависимости скоростей фундаментальной  $c_\phi$  и изгибной  $c_u$  волн для разных значений скоростей в дне: 1 – 1200 м/с, 2 – 1400 м/с, 3 – 1700 м/с, 4 – 2000 м/с

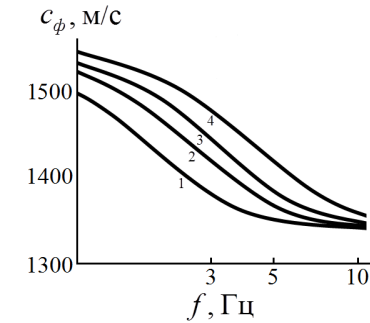


Рисунок 5 – Частотные зависимости скорости фундаментальной моды  $c_\phi$  для разных значений толщины жидкого слоя  $\Delta H$ : 1 – 176 м, 2 – 125 м, 3 – 100 м, 4 – 75 м

Для решения обратной задачи восстановления характеристик слоистой среды в первую очередь необходимо решить задачу о разделении различных типов волн в экспериментальных данных. Наиболее очевидное решение этой задачи может быть основано на пространственно-временном анализе информативных геоакустических полей при соответствующем выборе частотного диапазона.

Чтобы приступить к решению таких задач, следует организовать установку геоакустических датчиков как на льду, так и на дне.

Анализ существующих экспериментальных подходов показывает, что с практической точки зрения целесообразно разделить изучаемые информативные геоакустические моды по данным ледовых станций, анализируя времена их прихода с помощью оценки корреляционной функции. Это возможно всегда, поскольку скорость распространения изгибной волны в сейсмическом частотном диапазоне

значительно меньше скорости фундаментальной моды.

#### **ТЕХНОЛОГИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ МОДЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Изучение возможности регистрации фундаментальной (донной) волны на основе данных, принятых датчиками, расположенными на свободной поверхности льда, впервые было проведено нами при обработке данных ледовых экспериментов на льду Умбозера (Мурманская область) в 2013-2015 гг.

Целью проведенных экспериментальных работ было исследование закономерностей распространения сейсмоакустического сигнала и его трансформации в волны, распространяющиеся в водном слое, во льду, а также поверхностной волны, распространяющейся вдоль границы раздела «водный слой – упругое дно».

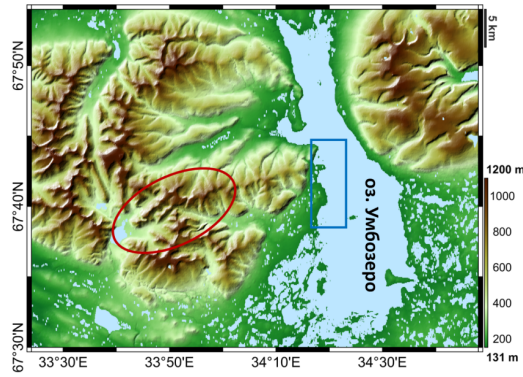


Рисунок 6 – Регион экспериментальных работ

Синим прямоугольником очерчена область, где осуществлялся прием геогидроакустической информации. Красным эллипсом обозначена область промышленных взрывов.

Район экспериментальных исследований (рисунок 6) был выбран с учетом того, что в окрестности озера присутствует несколько действующих горнодобывающих карьеров, хозяйственная деятельность которых сопровождается регулярными промышленными взрывами, которые мы использовали как источники полезного геогидроакустического сигнала.

Для регистрации волновых возмущений на льду использовалась разработанная авторским коллективом информационно-измерительная система, в состав которой входили широкополосные молекулярно-электронные датчики в герметичных корпусах для донной установки и маятниковые сейсмоприемники СМЗ-ОС для установки на лед. Оба типа используемых в экспериментах сейсмических датчиков являются вертикальными велосиметрами с высокой чувствительностью в полосе 0,03-15 Гц. Запись сигналов во

всех случаях велась на регистраторы типа RefTek 130B с частотой оцифровки 1000 Гц. При этом синхронизация записей на разных точках осуществлялась автоматически самим регистратором с опорой на стандартный GPS-приемник (рисунок 7).

В процессе подготовки к эксперименту была проведена калибровка всех используемых датчиков. В процессе экспедиционных работ была выполнена серия экспериментов по регистрации мощных импульсных сигналов при различном расположении информационно-измерительных систем и применяемых геогидроакустических приемников.

В первом эксперименте прием сигнала от промышленного взрыва осуществлялся на озере в двух точках, расположенных приблизительно на одной прямой с источником. Расстояние между точками составляло  $\Delta r = 500$  м, а расстояние между берегом и ближайшей точкой было равным 200 м. При этом сейсмометры устанавливались как на дне водоема, так и на поверхности льда.

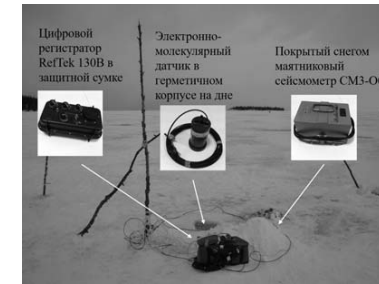


Рисунок 7 – Измерительный пункт на льду озера с указанием используемой аппаратуры.

Обработка записей проводилась на основе анализа взаимно-корреляционной функции (4) сигналов, записанных в двух различных точках [3]. В этом случае удается оценить функцию Грина двух точек, где находятся приемники, вид которой определяется свойствами среды. Этот подход удобен тем, что характеристики распространения сигнала между двух станций наблюдения могут быть оценены без знания об эпицентре и точном моменте взрыва.

$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(t + \tau) dt \quad (4)$$

где  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  – временные ряды, полученные соответственно с первого и второго датчиков.

На рисунке 8 показана часть взаимно-корреляционной функции сигналов, зарегистрированных на двух сейсмоприемниках, вычисленная для положительных значений временных задержек, что соответствует сигналу, зарегистрированному на второй точке, как если бы источник сигнала действовал в момент времени  $\tau = 0$  и находился в первой точке приема.

Анализ корреляционной функции для донных сейсмометров, проведенный в узкой полосе частот 5-8 Гц, и приведенный на рисунке 8 слева, позволяет выделить максимум, положение которого является оценкой времени распространения сигнала между приемниками 0,2 с.

Эти данные позволили определить скорость волны на дне водоема, вызванной взрывом. Она оказалась равной 2500 м/с.

По полученному значению скорости можно утверждать, что основной вклад в сигнал на донных станциях в полосе частот 5-8 Гц вносит фундаментальная мода.

У корреляционной функции для ледовых сейсмометров, приведенной на рисунке 8 справа, наблюдается уже два максимума при значениях 1,36 с и 0,2 с. Большой временной сдвиг соответствует более медленной изгибной волне, распространяющейся в слое льда (ее скорость в условиях эксперимента составляет 367 м/с).

Второй наблюдаемый максимум в точности равен временной задержке на донных сейсмометрах и соответствует скорости распространения донной волны.

Полученные в результате моделирования значения скоростей для изгибной и донной волны указывают на правильность сделанного предположения о выделении донной волны в данных, зарегистрированных датчиками, расположенными на льду.

В процессе экспериментов была проверена возможность оценки функции Грина между приемниками в пассивной схеме без использования сигналов от промышленных взрывов. Для решения этой задачи выделения волновых возмущений в среде по записям только сейсмического фона можно использовать функцию взаимной корреляции шума, применяя предвари-

тельное «обеление» и амплитудную нормализацию записей. При измерениях в этом случае расстояние между двумя при-

емниками СМЗ-ОС, установленными на лед, составляло 4 км, а накопление производилось в течение 40 часов.

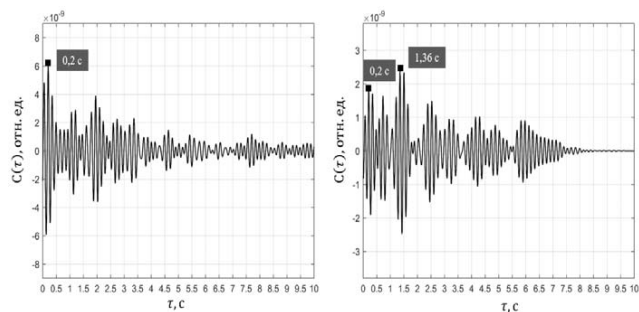


Рисунок 8 – Взаимо-корреляционная функция сигнала от промышленного взрыва, зарегистрированного на дне водоема (слева) и на поверхности льда (справа) (частота 5-8 Гц)

Впервые удалось показать, что и в случае пассивного эксперимента данные, зарегистрированные на льду, позволяют получить информацию о характеристиках распространения донной волны. Это в дальнейшем может быть использовано при решении ряда актуальных задач оборонного характера.

### ВЫВОДЫ

В процессе выполнения теоретических и экспериментальных полевых работ показано, что в слоистой среде типа «литосфера – гидросфера – ледовый покров» преобладают поверхностные волновые структуры:

- 1) высокоскоростная фундаментальная мода, которая несет информацию о строении морского дна и водного слоя;
- 2) низкоскоростная изгибная волна, параметры которой характеризуют состояние ледового покрова.

Параметрические исследования выявили сильную зависимость скорости фун-

даментальной моды (и слабую зависимость скорости изгибной моды) от толщины водного слоя и скоростных характеристик морского дна, а также слабое влияние толщины льда на скорость фундаментальной моды (в то время как на скорость изгибной моды толщина льда влияет сильно).

Натурный эксперимент в условиях водоема, покрытого льдом, и последующий частотно-временной анализ корреляционной функции сигналов, зарегистрированных донными и ледовыми широкополосными сейсмическими датчиками, позволил установить, что шумы, принимаемые на поверхности льда, несут полезную информацию о структуре дна. Шумовое поле при этом может быть исследовано методами, разработанными для анализа сейсмического шума. Новые фундаментальные результаты такого уровня получены впервые и, по нашим оценкам, имеют важное промышленное и оборонное значение.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // *Акустический журнал*. – 2014. – Т. 60, № 4. – С. 426-436.
2. Marsan D., Weiss J., Larose E., Metaxian J.-P. Sea-ice thickness measurement based on the dispersion of ice swell // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 131. N. 1. P. 80-91.
3. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // *Акустический журнал*. – 2008. – Т. 54, № 1. – С. 51-61.

УДК 530.343, 534.11

к.т.н. В.П. ДМИТРИЧЕНКО, к.ф.-м.н. Р.А. ЖОСТКОВ,  
к.ф.-м.н. Д.В. ЛИХОДЕЕВ, к.ф.-м.н. Д.А. ПРЕСНОВ

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОРСКОГО ДНА ПРИ НАЛИЧИИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

В работе с помощью численного моделирования методом конечных элементов показано, что для получения данных о глубинном строении морского дна достаточно информации о поверхностных волнах, получаемых с помощью сейсмостанций, устанавливаемых на ледовом покрове. Это возможно благодаря быстрой фундаментальной моде, несущей информацию о донной структуре и имеющей локальный максимум вблизи ледового покрова. Полученные результаты позволяют упростить технологию зондирования морского дна при проведении оперативной сейсмозондировки углеводородов на шельфе северных морей, покрытых льдом, на основе анализа распространения микросейсмических колебаний.

Арктический регион имеет стратегически важное значение, поэтому сейчас реализуется множество проектов по его освоению: разворачивается система мониторинга землетрясений [1], проводятся работы по сейсмическому и инфразвуковому мониторингу ледников, результаты которого помогут, в частности, отслеживать активность выводных ледников и повысить тем самым безопасность судоходства в северных морях [2-5]. Сейсмоакустический мониторинг ледников проводят и зарубежные ученые [6]. Часть этих работ выполняется в рамках международных проектов, что позволило образно назвать Арктику международной лабораторией для сейсмоакустических исследований [7]. В числе новых научных подходов в решении проблемы круглогодичного мониторинга среды в крайне сложных ледовых условиях на первый план выходит теоретическая разработка методов, основанных на экспериментальном измерении естественных геоакустических шумов [8, 9].

Наиболее точную информацию о физических параметрах неоднородной геофизической среды получают с помощью различных методов сейсмозондирования. Геофизические исследования на акваториях сводятся

к двум вариантам работ: использование буксируемых гидроакустических антенн, регистрирующих сигналы от активного источника, либо сейсмические станции, устанавливаемые на морское дно. В случае наличия ледового покрова технологии с буксируемыми гидроакустическими антеннами использовать невозможно, а использование донных сейсмических станций затруднено как при установке (поскольку требуется бурение льда), так и при извлечении данных (поскольку, как правило, требуется физический доступ к приемнику). Кроме того, донные сейсмические станции значительно дороже обычных в силу их более сложной конструкции. Поэтому существует необходимость в разработке новых методов зондирования земли для условий покрытых льдом акваторий.

В последнее время все большую популярность приобретают методы, основанные на использовании данных о поверхностных акустических волнах. Это объясняется тем, что эти волны распространяются только в горизонтальных направлениях, что приводит к их преобладанию в сейсмоакустическом сигнале из-за меньшего затухания. Эти технологии [10-12] хорошо зарекомендовали себя при геофизических исследованиях на суше [13-16]. Поэтому в рамках



данной статьи проводится исследование поверхностных волн, нацеленное на разработку подходов, позволяющих проводить глубинное зондирование морского дна посредством измерения сейсмических полей на поверхности ледового покрова. Для этого необходимо тщательное исследование особенностей распространения поверхностных волн в слоистых средах.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество различных упругих моделей слоистых сред. Подробный обзор решений по близкой тематике можно найти в монографии [17]. Для начального рассмотрения представляет интерес работа [18], где описана модель, включающая дно и жидкий слой. Решение для такой упрощенной модели совместно с некоторыми допущениями использовать и при наличии ледового покрова. Введение в модель среды ледового покрова главным образом открывает новые возможности для экспериментального измерения упругих колебаний прямо с твердой поверхности льда. Эффекты, вызванные наличием ледового покрова, существенно зависят от упругих параметров льда, которые в природных условиях изменяются значительно. Еще более сложная модель рассмотрена в [19], где также учтена неоднородность ледовой пластины с внутренней стороны.

Впервые модовая структура упругих волн в плавающей ледяной пластине была теоретически описана и измерена экспериментально в [20, 21]. Хотя в настоящее время возможности для экспериментального наблюдения и численного моделирования значительно улучшились, современное понимание режимов распространения волн в подобного рода задачах мало изменилось по сравнению с этими пионерскими работами.

Набирают популярность и экспериментальные работы в тяжелых ледовых условиях. Здесь выделяются работы, цель которых – определение механических параметров достаточно мощных ледников на основе измерения сейсмических сигналов. В

работе [22] с использованием сейсмической группы, установленной на льду в Гренландии, выполнен азимутальный анализ и определен эпицентр сигнала, причиной которого является трение и соударение ледников, а также представлены результаты измерения фазовых скоростей сейсмических волн, обсуждены вопросы инверсии полученных скоростей в параметры ледника.

Для изучения полной волновой картины в системе «морское дно – водный слой – ледовый покров – атмосфера» было решено использовать тщательное численное моделирование с использованием самого современного программного пакета для реализации метода конечных элементов COMSOL. С данными теоретических расчетов и полевых экспериментов можно ознакомиться в работах [24-28].

В экспериментальной структуре была создана двумерная модель линейной идеальной среды, представляющей систему «литосфера – гидросфера – ледовый покров – атмосфера». В каждой зоне была построена структурная сетка с оптимально подобранным пространственными шагами (рисунок 1). Для корректного согласования этих зон использовались переходные области с треугольными конечными элементами. Шаг по времени определялся из условия Куранта – Фридрихса – Леви с запасом прочности, равным 4. Параметры среды, представленные в таблице 1, соответствовали тем, что использовались при проведении большей части аналитических исследований и полевых экспериментов. Модель была верифицирована и исследована на сходимость – ошибка вычисления составляет не более 0,5%. В качестве источника использовался импульс Рикера, а на границах были заданы слабоотражающие условия. При этом размеры модели были выбраны такими, чтобы избежать проникновения отраженных от границ волн в область, где были равномерно размещены виртуальные датчики (200 на дне, 200 на льду и 200 в воздухе) вдоль профиля протяженностью 1500-15000 м.

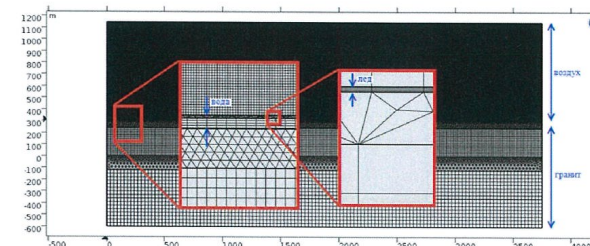


Рисунок 1 – Модель среды «морское дно – жидкий слой – ледовый покров – атмосфера»

Таблица 1 – Параметры модели среды для численного моделирования

	Толщина, м	$c_l$ , м/с	$c_t$ , м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Атмосфера	$\infty$	330	–	1,29
Ледовый покров	0,4	2200	1270	900
Жидкий слой	20	1500	–	1020
Дно	$\infty$	3000	1732	2600
Включение	$\infty$	3286	1897	2600

В рамках этой модели было выполнено множество реализаций, отличающихся различными параметрами: расположением точечного источника (его вертикальная координата), его типом (источник давления или смещения, а также характерный спектр), наличием и параметрами слоя осадков и вертикального контрастного донного включения. В качестве примера на рисунке 2 приведены данные с виртуальных сейсмометров и микрофонов для одной из реализаций. Как видно из рисунка 2, поведение волны на поверхности льда почти полностью повторяет колебания дна в случае, когда изгибная мода сильно отстает от фундаментальной. Это свидетельствует о возможности получения информации о структуре морского дна с помощью ледовых приемников. На записи микрофона выделяется также две волны – быстрая вытекающая

фундаментальная мода и медленная сферическая волна от точечного источника.

Настоящая работа нацелена на исследование возможностей получения данных о структуре морского дна с помощью приемников, расположенных лишь на льду, так что наибольший интерес представляет часть фундаментальной моды, несущей информацию о глубинном строении, сконцентрированной вблизи ледового покрова. Выделить такую компоненту возможно даже при пассивных наблюдениях, однако при численном моделировании требуется задать источник. Таким образом можно определить особенности активного зондирования морского дна и общие черты пассивного варианта, если учесть, что этот случай сводится к усреднению по большому количеству естественных источников.



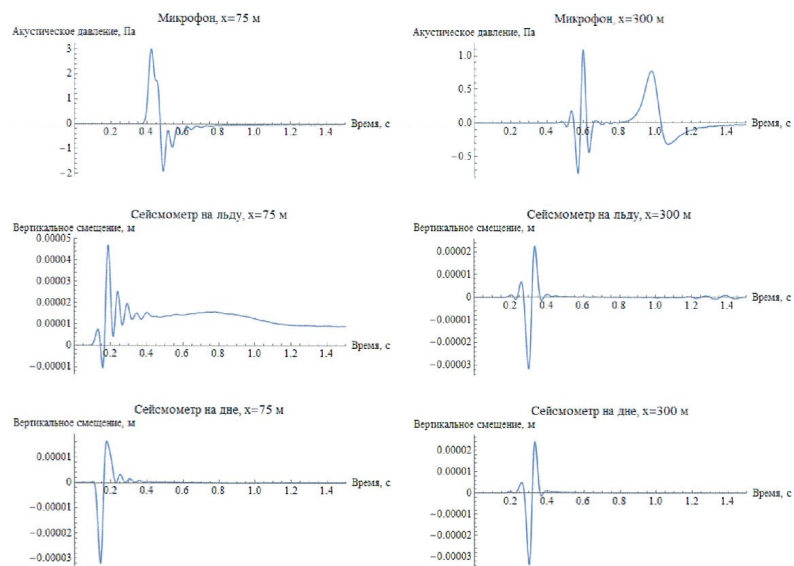


Рисунок 2 – Примеры данных численного моделирования

Сравнивая амплитуды при различных расположениях источника (рисунок 3), можно установить, что фундаментальную моду наиболее эффективно возбуждает источник вблизи дна, поэтому при проведении реальных полевых работ, подразумевающих активный источник, рекомендуется располагать его на дне. Тем не менее при отсутствии такой возможности приемлемым будет и вариант размещения источника на льду или вблизи него. Придонное расположение источника также приводит к тому, что амплитуда возбуждаемой изгибной моды гораздо меньше, чем в случае распо-

ложения источника у льда, что является положительным эффектом, т. к. в нашем случае изгибная мода является помехой.

Кроме того, для исключения влияния изгибной моды при регистрации фундаментальной волны на льду расчетная модель была модернизирована: область, в которой располагались виртуальные приемники, была удалена от источника таким образом, чтобы за время прохождения фундаментальной волны всей интересующей области (от первого до последнего приемника) изгибная мода не успела бы распространиться до начала этой области.

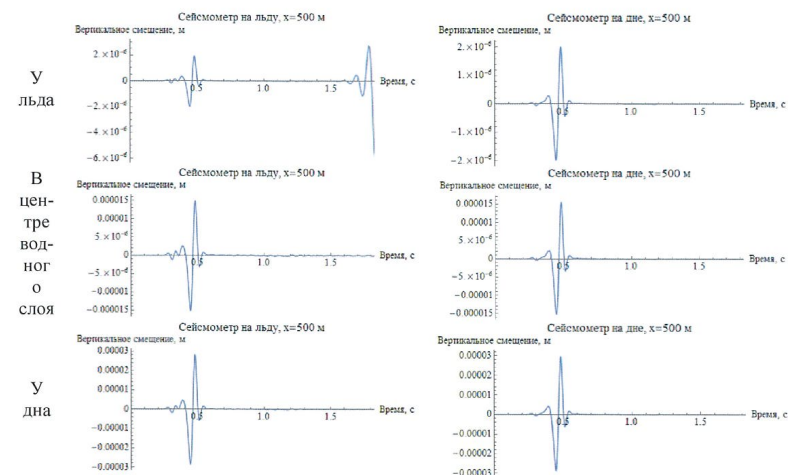


Рисунок 3 – Сравнение полей смещений на льду и дне при разном расположении источника

Исключение из рассмотрения изгибной моды, несмотря на то, что ее вклад в поле на поверхности льда может быть гораздо больше, чем фундаментальной моды, оправдано следующими соображениями.

Во-первых, в случае проведения зондирования с активным источником возможно занести в пространстве исследуемую область и источник так, чтобы фундаментальная и изгибная моды разделились во времени.

Во-вторых, даже в случае пассивного зондирования эффекты, вызванные фундаментальной модой, возможно выделить на фоне помехи, представляемой изгибной модой, потому что она несет информацию только о структуре льда, которую (учитывая то, что характерный размер локальных неоднородностей много меньше длины изгибной волны) можно считать однородной и изотропной, а значит, и усредненное по времени поле изгибной волны будет однородным, что позволяет его исключить при рассмотрении лишь акустических вариаций вблизи льда.

Подобный подход используется в разработанном в ИФЗ РАН методе микросейсмического зондирования [10], который заключается в определении субвертикальных неоднородностей среды по данным относительной интенсивности микросейсмического шума. Распределение по горизонтали в этом методе определяется расположением сейсмоприемников, а по вертикали – примерно половиной длины зондирующей волны, при этом области с пониженной относительной интенсивностью соответствуют более плотным зонам, а с повышенной – более рыхлым.

Важным вопросом в этом случае является необходимое время накопления фонового сигнала на льду. В случае использования технологии микросейсмического зондирования на суше за многолетнюю практику показано, что это время составляет около 2 часов. В случае наличия ледового покрова это время значительно возрастает. Полевые работы на Умбозере и Ладожском озере [25] показали, что это время может превышать 8-10 часов, но, строго говоря,

для каждого района исследований и погодных условий это время может быть свое, что необходимо учитывать при проведении полевых работ. Необходимое время накопления сигнала можно определить с помощью обработки части получаемых экспериментальных данных. Для этого необходимо определить время, за которое систематическая ошибка регистрируемых данных достигнет требуемого уровня.

Перейдем к исследованию рассеяния фундаментальной моды на локальном контрастном включении 3000-метровой ширины и бесконечной глубины. Это включение расположено по центру исследуемой области и отличается модулем Юнга, превышающим на 20% таковой во вмещающей среде. Обработка данных численных экс-

периментов осуществлялась в программном пакете Wolfram Mathematica 10 и заключалась в определении и сглаживании спектров синтетических сейсмограмм, выделении компонент, соответствующих несущим частотам, пространственной фильтрации и нормировки на соответствующие значения, рассчитанные для однородного полупространства. Также проводилось усреднение поля относительной интенсивности фундаментальной моды по бегущим с разных сторон волнам. Описанная обработка соответствует применению метода микросейсмического зондирования. Сравнение интерпретации в соответствии с методом микросейсмического зондирования данных, получаемых с датчиков на дне и на льду, представлено на рисунке 4

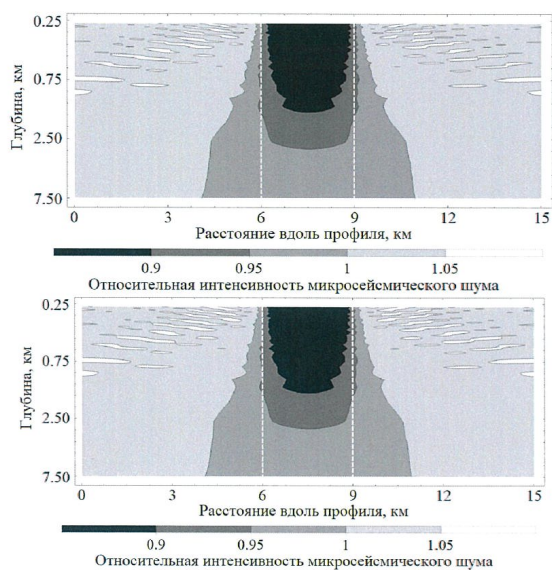


Рисунок 4 – Результат восстановления вертикальной неоднородности бесконечной высоты шириной 3 км (границы отмечены пунктиром) с модулем Юнга на 20% большим, чем во вмещающей среде. Вверху – по данным ледовых датчиков, внизу – по данным донных датчиков

Эти результаты практически неотличимы, что открывает широкие перспективы для амплитудных методов зондирования морского дна с помощью датчиков на льду. Для исследования малозаглубленных неоднородностей необходимо использовать более высокие частоты, которые обычно отсутствуют в естественном микросейсмическом шуме. Для увеличения скорости счета при больших частотах длина исследуемого профиля и ширина локального включения были уменьшены в 10 раз – до 1,5 и 0,3 км соответственно (рисунок 5). В этом случае наблюдается существенное различие результатов восстановления, но только в самой верхней части – когда исследуемая глу-

бина лишь в несколько раз превышает глубину акватории. При больших глубинах восстановление неоднородной структуры по данным ледовых датчиков можно считать хорошим. Для реальных акваторий свойственно наличие слоя мягких осадков, покрывающих морское дно, поэтому для доказательства работоспособности развиваемой технологии была рассмотрена пятислойная среда «морское дно – слой осадков – водный слой – ледовый покров – атмосфера», содержащая то же самое локальное контрастное включение. При этом модуль Юнга слоя осадков мощностью 200 м был на 20% меньше, чем у упругого полупространства (рисунок 6).

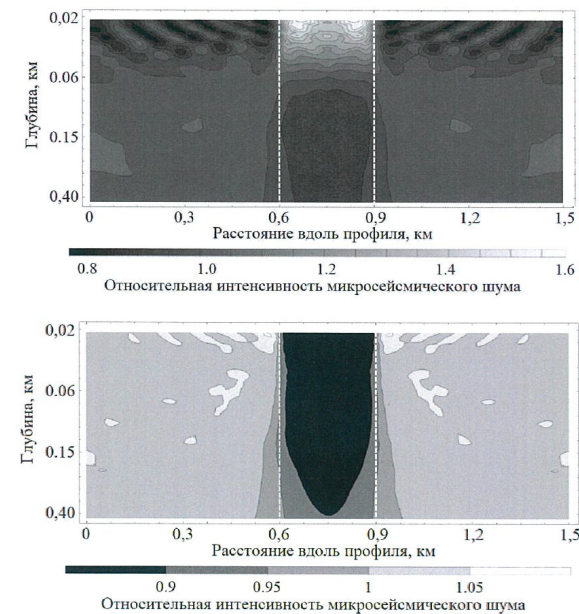


Рисунок 5 – Результат восстановления вертикальной неоднородности бесконечной высоты шириной 0,3 км (границы отмечены пунктиром) с модулем Юнга на 20% большим, чем во вмещающей среде. Вверху – по данным ледовых датчиков, внизу – по данным донных датчиков



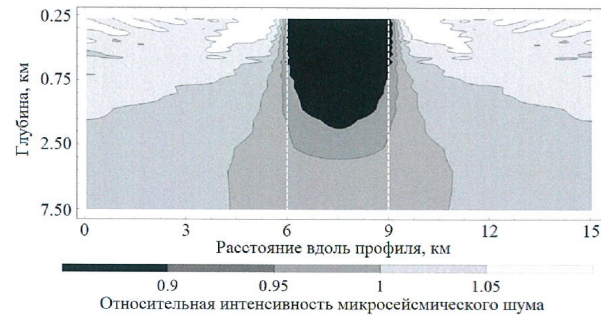


Рисунок 6 – Результат восстановления вертикальной неоднородности бесконечной высоты шириной 3 км (границы отмечены пунктиром) с модулем Юнга на 20% большим, чем во вмещающей среде, при наличии слоя мягких осадков, по данным ледовых датчиков

Рассмотрим теперь волновое поле в атмосфере, ассоциируемое с вытекающими волнами. Вытекающая мода изгибной волны в рассматриваемом низкочастотном диапазоне (характерном для микросейсмического шума) не образуется, поскольку в этом случае скорость изгибных волн меньше скорости звука в атмосфере. Однако при частотах больше 10 Гц и большой мощности ледового покрова вытекающая волна изгибной моды может образовываться, что требует дополнительного исследования. Поэтому, несмотря на то, что амплитуда изгибной волны может быть больше амплитуды фундаментальной моды, регистрируемой на поверхности льда (как показывает анализ фона при полевых экспериментах, это различие может составлять до 10-

оказывает.

Интересно, что такое свойство вытекающей волны позволяет сделать предположение о возможности получения информации о глубинном строении морского дна по данным акустического поля вытекающей волны. Ожидаемым преимуществом оценки структуры морского дна по данным акустического поля в атмосфере является то, что на льду приходится бороться с помехами, вызванными изгибной модой, в то время как поле в атмосфере в основном сформировано фундаментальной волной, но есть, конечно, и иные источники помехи. Обработка данных о вытекающей волне позволила восстановить контрастное включение в морском дне (рисунок 7).

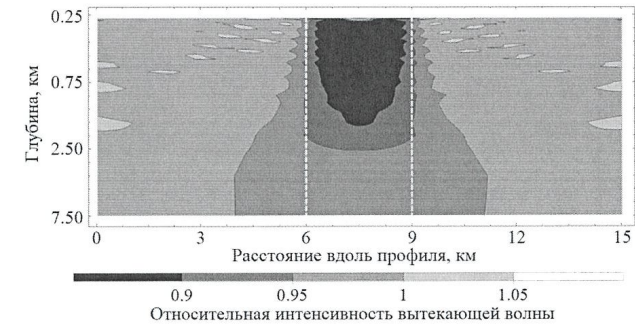


Рисунок 7 – Результат восстановления вертикальной неоднородности бесконечной высоты шириной 3 км (границы отмечены пунктиром) с модулем Юнга на 20% большим, чем во вмещающей среде, по данным об акустическом поле, создаваемом вытекающей волной

Таким образом, результаты зондирования морского дна по данным ледовых, атмосферных и донных датчиков практически не отличаются (при условии, что длины зондирующих сигналов превышают глубину исследуемой акватории в несколько раз). Это доказывает возможность использования информации, получаемой со льда или даже в воздухе, для восстановления неоднородной структуры

морского дна с помощью методов, анализирующих амплитудные характеристики поля поверхностных волн. Этот вывод позволяет существенно упростить технологию зондирования морского дна при проведении оперативной сейсморазведки углеводородов на шельфе северных морей, покрытых льдом, на основе анализа распространения микросейсмических колебаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рогожин Е.А., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К. Современное состояние и перспективы развития системы сейсмического мониторинга Арктики // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2015. – Т. 42, № 1. – С. 58-69.
2. Виноградов Ю.А., Асминг В.Э., Баранов С.В., Федоров А.В., Виноградов А.Н. Сейсмоинфразвуковой мониторинг деструкции ледников (пилотный эксперимент на архипелаге Шпицберген) // Сейсмические приборы. – 2014. – Т. 50, № 1. – С. 5-15.
3. Федоров А.В., Асминг В.Э. Мониторинг активности ледников Шпицбергена сейсмическим методом // Наука и технологические разработки. – 2015. – Т. 94, № 4. – С. 44-52.
4. Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов Ю.А., Воронин А.И. Сейсмоинфразвуковой мониторинг на Шпицбергене // Сейсмические приборы. – 2012. – Т. 48, № 3. – С. 32-45.
5. Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Использование инфразвукового метода для мониторинга деструкции ледников в арктических условиях // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62, № 5. – С. 582-591.
6. Walter F., Roux P., Roeoesli C., Lecointre A., Kilb D., Roux P-F. Using glacier seismicity for phase velocity measurements and Green's function retrieval // Geophysical Journal International. 2015. Vol. 201, No. 3. P. 1722–1737.

7. Gibbons S.J., Asming V., Fedorov A., Fyen J., Kero J., Kozlovskaya E., Kværna T., Liszka L., Näsholm S.P., Raita T., Roth M., Tiira T., Vinogradov Yu. The European Arctic: A laboratory for seismoacoustic studies // *Seism. Res. Letters*. 2015. Vol. 86, No. 3. P. 917-928.
8. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. Использование в пассивной томографии океана низкочастотных шумов // *Акустический журнал*. – 2008. – Т. 54, № 1. – С. 51-61.
9. Brown M.G., Godin O.A., Williams N.J., Zabolin N.A., Zabolina L.Y., Banker G.J. Acoustic Green's function extraction from ambient noise in a coastal ocean environment // *Geophys. Res. Lett.* 2014. Vol. 41, No. 15. P. 5555-5562.
10. Горбатиков А.В. Пат. РФ № 2271554. Бюллетень изобретений. – 2006. – № 7.
11. Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. – 2011. – № 4. – С. 96-112.
12. Яновская Т.Б. К теории метода микросейсмического зондирования // *Физика Земли*. – 2017. – № 6. – С. 18-23.
13. Лиходеев Д.В., Дуларов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б. Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // *Вулканология и сейсмология*. – 2017. – № 6. – С. 28-32.
14. Овсиченко А.Н., Собисевич А.Л., Сысолов А.И. О взаимосвязи современных тектонических процессов и грязевого вулканизма на примере горы Карабегова (Таманский п-ов) // *Физика Земли*. – 2017. – № 4. – С. 118-129.
15. Собисевич А.Л., Тверитникова Т.Ю., Лиходеев Д.В., Белобородов Д.Е., Дуларов З.И., Долов С.М., Преснов Д.А., Пузич И.Н. Глубинное строение грязевого вулкана Джарджав в пределах Южно-Керченской антиклинальной структуры // *Вопросы инженерной сейсмологии*. – 2015. – Т. 42, № 2. – С. 73-80.
16. Горбенко В.И., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных волн // *Сейсмические приборы*. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 5-19.
17. Петухов Ю.В., Разин А.В., Собисевич А.Л., Куликов В.И. Сейсмоакустические и акустико-гравитационные волны в слоистых средах. – М.: ИФЗ РАН, 2013.
18. Лапин А.Д. Возбуждение волн в твердом полупространстве, покрытом жидким слоем // *Акустический журнал*. – 1992. – Т. 38, № 2. – С. 364-367.
19. Луньков А.А., Петников В.Г. Распространение звука в мелководном арктическом волноводе с ледовым покровом // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. – № 5.
20. Ewing M., Stry A.P. // *Physics*. 1934. V. 5. P. 165.
21. Press F., Ewing M. // *Eos Trans. AGU*. 1951. № 32. P.673.
22. MacAyeal D.R., Wang Y., Okal E.A. // *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2015. V. 120. P. 200.
23. COMSOL Multiphysics 5.3 Лицензия № 9600341.
24. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // *Акустический журнал*. – 2014. – Т. 60, № 4. – С. 426-436.
25. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2017. – Т. 81, № 1. – С. 76-80.
26. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С., Лиходеев Д.В., Агафонов В.М. Геогидроакустический шумовой мониторинг подледных акваторий северных морей // *Наука и технологические разработки*. – 2017. – Т. 96, № 3. – С. 31-46.
27. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С. Гео-гидроакустические поля – основа инновационных технологий мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов в Арктике // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2018. – Т. 82. – № 5.
28. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С. О локализации геологических неоднородностей арктического шельфа на основе анализа модовой структуры сейсмоакустических полей // *Доклады Академии наук*. – 2018. – Т. 479, № 1. – С. 80-83.

УДК 530.343, 534.11

С.Ю. АВДЮХИНА, к.т.н. В.М. АГАФОНОВ,  
д.ф.-м.н. А.С. БУГАЕВ, П.Д. ГРУЗДЕВ, В.Г. ДАНИЛОВА,  
к.ф.-м.н. Е.В. ЕГОРОВ, к.ф.-м.н. Д.Л. ЗАЙЦЕВ

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ И МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЕМНИКОВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В статье описаны принципы работы и приведены сравнительные характеристики пьезокерамических и молекулярно-электронных гидрофонов, которые могут быть использованы в специализированных информационно-измерительных системах ледового класса.

Исследование низкочастотных гидроакустических сигналов сталкивается с серьезной проблемой отсутствия необходимой элементной базы измерений, обладающей, с одной стороны, достаточной чувствительностью, а с другой – низким уровнем собственных шумов ниже модели Венца, представленной в работе [1]. Известен ряд технологий датчиков акустического давления: пьезоэлектрические [2], оптические [3], лазерные датчики на основе оптического отражения в волокне [4], решетках Брега [5], интерферометре Фабри-Перо [6, 7]. Тем не менее для исследования слабых сигналов в области низких частот указанные технологии по совокупности ценовых и технических параметров не всегда доступны.

### ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ ГИДРОФОНЫ

Для регистрации гидроакустических сигналов в настоящее время активно применяются пьезоэлектрические приемники гидроакустических сигналов (гидрофоны). Они зарекомендовали себя как надежные приборы и обладают рядом преимуществ, таких как прочность, неприхотливость, широкий диапазон температур применения,

отсутствие потребления электроэнергии при нахождении гидрофона в ждущем режиме. Собственная чувствительность около 100 мкВ/Па при применении малошумящих согласующих устройств позволяет регистрировать сигналы на уровне морских шумов. Включение в схему многокаскадного усилителя позволяет увеличить выходную чувствительность до уровня, необходимого для корректной регистрации слабых гидроакустических сигналов. В то же время необходимо отметить, что сложность согласования предварительного усилителя с пьезоэлектрическим чувствительным элементом на низких частотах затрудняет его использование на частотах ниже 1 Гц.

Чаще всего применяется конструкция гидрофона, показанная на рисунке 1 и состоящая из сферического пьезоэлемента (1), приклеенного к металлической втулке (2). Герметизация с экранированным проводом (5) выполняется резиной или полиуретаном (3, 4). Электрод, нанесенный на внутреннюю поверхность пьезоэлемента, электрически соединен с жилой провода, а электрод наружной поверхности – с экраном. Для защиты поверхности пьезоэлемента от внешних факторов его покрывают резиной, полиуретаном или лаком.

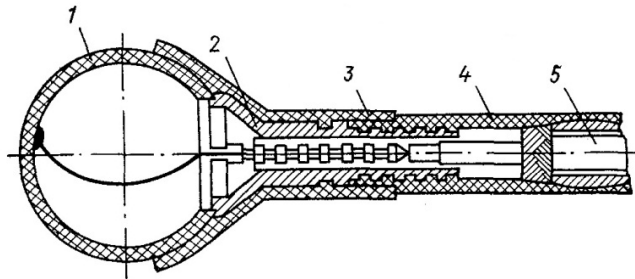


Рисунок 1 – Конструкция сферического гидрофона

Гидрофоны такой конструкции обладают сферической характеристикой направленности во всем диапазоне принимаемых частот и малой зависимостью параметров от гидростатического давления. Кроме того, они являются обратимыми преобразователями, способными не только принимать, но и излучать гидроакустические сигналы. Несмотря на невысокую чувствительность по сравнению со стержневыми пьезопреобразователями, сферические гидрофоны имеют более

простую конструкцию и меньшие габариты с учетом необходимости установки стержневых преобразователей в герметичный корпус. В зависимости от размера пьезоэлемента гидрофоны используются для различных диапазонов частот. На рисунке 2 приведены характерные частотные характеристики чувствительности гидрофонов с пьезоэлементами различного диаметра. Цифрами обозначены порядковые номера гидрофонов в соответствии с таблицей 1.

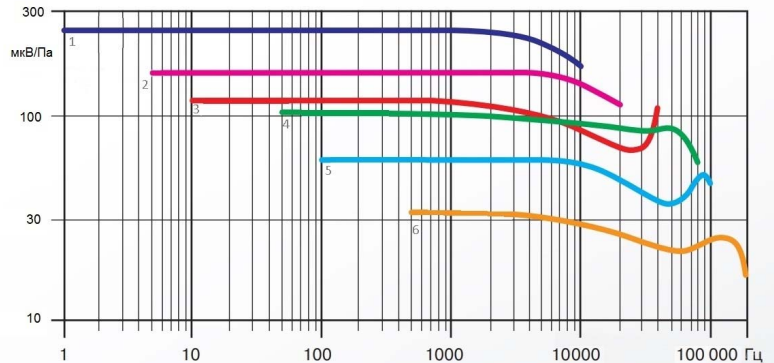


Рисунок 2 – Частотные характеристики чувствительности различных гидрофонов: по оси абсцисс – Гц, по оси ординат – мкВ/Па

Таблица 1 – Параметры гидрофонов с пьезоэлементами различного размера

Номер на графике	1	2	3	4	5	6
Диапазон частот, Гц	1-10 000	5-20 000	10-40000	50-80000	100-100000	500-200000
Электрическая емкость, пФ	35 000	25 000	13 500	7 500	4 500	3 500
Диаметр сферического пьезоэлемента, мм	80	50	30	20	15	10

### МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИЕМНИКИ

Для разработки датчиков давления также может быть применена технология, основанная на принципах молекулярно-электронного переноса (МЭП) заряда. Датчики колебательной скорости, построенные по данной технологии, хорошо зарекомендовали себя при работе в области сейсмологии и геофизических исследований [8, 9], геодезии [10] и сейсмической безопасности [11]. Отличительными особенностями датчиков на основе МЭП являются высокая чувствительность и низкий уровень собственных шумов. Однако следует отметить, что они обладают пониженной ударопрочностью и временной стабильностью, а также могут использоваться только при температурах среды не ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  из-за замерзания электролита.

В настоящей работе представлены результаты разработки низкочастотного (0,02-200 Гц) молекулярно-электронного гидрофона с низким уровнем собственных шумов и высокой чувствительностью. Как и все устройства на основе МЭП, молекулярно-электронный гидрофон работает по принципу возникновения сигнального тока при протекании жидкости через преобразующую электрохимическую ячейку. Для достижения широкого динамического диапазона и высоких показателей стабильности характеристик

в конструкцию гидрофона введена глубокая электродинамическая обратная связь.

Фундаментальные принципы работы систем на основе МЭП подробно изложены в учебных [12], научно-популярных [13] и периодических [14] изданиях. Основу устройства, работающего по технологии МЭП, составляет электрохимическая ячейка (рисунок 3), которая преобразует поток электролита, протекающий через нее, в сигнальный ток сенсора. Практическая реализация устройств на основе МЭП в качестве рабочей жидкости традиционно использует высококонцентрированный водный раствор электролита на основе йодида калия KI или йодида лития LiI с небольшой добавкой молекулярного йода I<sub>2</sub>.

В растворе происходит полная диссоциация KI на отрицательно заряженные ионы I<sup>-</sup> и положительные ионы K<sup>+</sup>, а молекулярный йод вступает в реакцию с ионами I<sup>-</sup> с образованием отрицательно заряженных ионов трийодида по схеме:  $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$ . Если к помещенным в раствор электродам приложена небольшая разность потенциалов ( $<0.9\text{ В}$ ), то на электродах протекают обратимые электрохимические реакции с переносом электронов через границу раздела металл/раствор электролита:  $I_3^- + 2e \rightarrow 3I^-$ , причем на катодах идет реакция в прямом направлении, а на анодах – в обратном. При этом в системе



устанавливается распределение концентрации активного компонента. В стационарном случае в отсутствие внешних сигналов ток, текущий через электроды, полностью определяется диффузионной составляющей. При наличии гидродинамических потоков к диффузионному добавляется конвективный перенос, что в зависимости от направления течения жидкости приводит к увеличению или уменьшению тока в системе. Вариации электрического тока, обусловленные возникающими гидродинамическими потоками, и являются выходным сигналом МЭП. Конструкция гидрофона

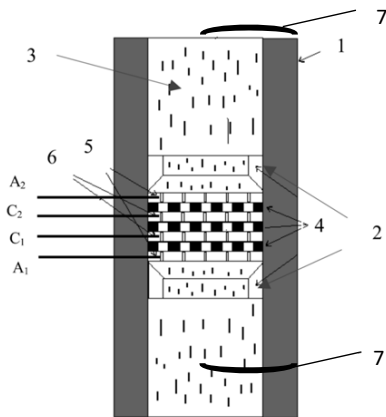


Рисунок 3 – Чувствительный элемент МЭП на примере датчика линейных перемещений:

1 – стенки корпуса канала, 2 – резиновые уплотнители, 3 – электролит,

4 – пористые диэлектрические прокладки, 5 – внешние электроды (аноды, A1, A2),

6 – внутренние электроды (катоды C1, C2), 7 – эластичные мембраны, ограничивающие канал

В конструкцию экспериментального макета вошли элементы силовой электродинамической отрицательной обратной связи, введенной для стабилизации параметров и расширения динамического диапазона. При разомкнутой обратной связи на катушку можно подавать периодические сигналы и искусственно вызывать поток жидкости через ячейку, имитируя вариации внешнего

имеет сходство с датчиком линейных перемещений, схематично описанного выше, однако имеются и существенные отличия, которые позволяют использовать МЭП ячейку для измерения вариаций внешнего давления. Одна из мембран гидрофона обращена во внешнюю среду, и воспринимает действующее в ней давление. При этом вторая мембрана герметично накрывается твердым колпаком, запирающим небольшой объем воздуха под крышкой, что позволяет регистрировать вариации давления, так как в сосуде с воздухом при деформации другой мембраны меняется давление.

давления. При известной передаточной характеристике каскада обратной связи указанный способ может быть использован для самокалибровки гидрофона в любых условиях, в том числе полевых. Экспериментально было показано, что частотная зависимость коэффициента преобразования чувствительной ячейки гидрофона, снятая с помощью самокалибровки катушкой обратной

связи, соответствует стандартной калибровке давлением (рисунок 4). Показанное соответствие существенно упрощает процесс настройки и проверки характеристик чувствительных элементов, особенно в полевых условиях. В рамках исследования

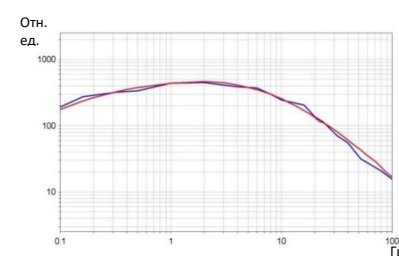


Рисунок 4 – Сравнение АЧХ чувствительного элемента молекулярно-электронного гидрофона при самокалибровке катушкой (красная кривая) и калибровке на стенде изменения давления (синяя кривая). По оси ординат – относительные единицы

удалось получить образцы молекулярно-электронных гидрофонов с чувствительностью не менее 750 мкВ/Па в полосе частот от 0.02 Гц до 200 Гц с неравномерностью характеристики не более 0.5 дБ в полосе (рисунок 5).

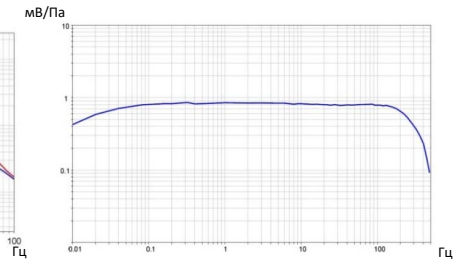


Рисунок 5 – Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) молекулярно-электронного гидрофона. По оси абсцисс – Гц, по оси ординат – мВ/Па

Результаты определения спектральной плотности шума молекулярно-электронных гидрофонов представлены на рисунке 6.

Экспериментальное исследование собственных шумов было выполнено методом корреляционного анализа в соответствии с методикой, подробно описанной в [15] и [16], на двух идентичных, близко рас-

положенных МЭП гидрофона. На рисунке представлены записи спектральной плотности шума двух молекулярно-электронных гидрофонов (красный и синий), а также собственный шум аналого-цифрового преобразователя (зелёный) и некоррелированная часть спектральной плотности, имеющая смысл уровня собственного шума гидрофона (фиолетовый).

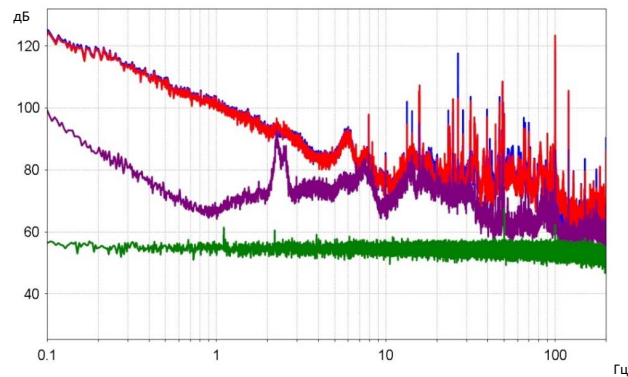


Рисунок 6 – Экспериментально замеренный собственный шум молекулярно-электронного гидрофона в дБ относительно 1 мкПа/√Гц, по оси абсцисс – частота в Гц

### ВЫВОДЫ

Из рассмотренных материалов видно, что оба вида гидрофонов имеют свои преимущества и недостатки при использовании различных условиях эксплуатации.

Пьезокерамические гидрофоны обладают стабильностью параметров в широком диапазоне частот в течение многих лет и имеют сферическую характеристику направленности во всем частном диапазоне. Они обратимы и при необходимости могут работать как излучатели. Однако их практическое использование ограничивается частотным диапазоном выше 1 Гц, поскольку на более низких частотах у них существенно возрастают собственные шумы.

Молекулярно-электронные приемники имеют частотную характеристику с неравномерностью не более 0,5 дБ вплоть до инфразвуковых частот (на макетных образцах обеспечен частотный диапазон до 0,02 Гц). Однако они не обладают высокой стабильностью параметров и требуется их периодическая калибровка практически перед каждым испытанием. Кроме того, в конструкции этих приемников имеются проблемы с обеспечением ударопрочности, и они могут быть использованы при температурах не ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ . Тем не менее для экспериментальных работ и при проведении их оперативной самокалибровки они могут быть эффективно использованы для регистрации колебаний в инфразвуковом диапазоне частот.

### ЛИТЕРАТУРА

1. G.M. Wenz, Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources, The journal of the acoustical society of America, V. 34, N. 12, 1962, P. 1936-1956
2. Пат. США №4178577, кл. 367-159 (H04B 13/00), 1979.
3. Liu, D., Liang, Y., Jin, L., Sun, H., Cheng, L., and Guang, B.-O.: Highly sensitive fiber laser ultrasound hydrophones for sensing and imaging applications, Optics Letters, vol. 41, no. 19, October 1 2016.
4. Shen, B., Wada, Y., Koyama, D., Isago, R., Mizuno, Y. and Nakamura, K.: Fiber-optic ultrasonic probe based on refractive-index modulation in water, in Proceedings of SPIE 7753 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, 7753, pp.77539W, 2011.

5. Tan, Y., Zhang, Y. and Guan, B.: Hydrostatic pressure insensitive dual polarization fiber grating laser hydrophone, IEEE Sens. J., vol. 11, no. 5, pp. 1169-1172, 2011.
6. Kim, K.S., Mizuno, Y., Nakamura, K.: Fiber-optic ultrasonic hydrophone using short Fabry-Perot cavity with multilayer 5 reflectors deposited on small stub, Ultrasonics, vol. 54, no. 4, pp. 1047-1051, 2014.
7. Ma, J., Zhao, M., Huang, X., Chen, H. B. Y., and Yu, M.: Low cost, high performance white-light fiber optic hydrophone system with a trackable working point, Opticsexpress, vol. 24, no. 17, 19008, 22 Aug 2016.
8. T. Deng, D. Chen, J. Chen, Z. Sun, J. Wang, "Microelectromechanical Systems-Based Electrochemical Seismic Sensors With Insulating Spacers Integrated Electrodes for Planetary Exploration", IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 16, NO. 3, FEBRUARY 1, 2016.
9. D.G. Levchenko, I.P. Kuzin, M.V. Safonov, V.N. Sychikov, I.V. Ulomov, and B.V. Kholopov, "Experience in seismic signal recording using broadband electrochemical seismic sensors", Seism. Instruments, vol. 46, no. 3, pp. 250-264, 2010.
10. D. Zaitsev, A. Antonov, V. Krishtop "Angular MET sensor for precise azimuth determination", Proceedings Volume 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016;10224IH (2016); doi: 10.1117/12.2267073
11. G.N. Antonovskaya, N.K. Kapustian, A.I. Moshkunov, A.V. Danilov, K.A. Moshkunov, "New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring," J Seismol (2017) 21: 1039. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9650-8>
12. N.S. Lidorenko, B.I. Ilin, I. A. Zaidenman, V.V. Sobol, I.G. Shchigorev, "An Introduction to Molecular Electronics", Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1984, p. 320.
13. V.M. Agafonov, A.N. Neeshpapa, and A.S. Shabalina, "Electrochemical seismometers of linear and angular motion," in Encyclopedia of Earthquake Engineering. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 944-961, 2015.
14. A.S. Shabalina et al., "Modern measuring instruments based on molecular electronic transducers," Achievements Modern Radioelectron., vol. 9, pp. 4-33, Sep. 2014. [Online]. Available: <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr4&art=15249>
15. D.L. Zaitsev, V. Agafonov, E. Egorov, A. Antonov, and A. Shabalina, "Molecular electronic angular motion transducer broad band self-noise," Sensors, vol. 15, no. 11, pp. 29378-29392, 2015.
16. I.V. Egorov, A.S. Shabalina, V.M. Agafonov, "Design and Self-Noise of MET Closed-Loop Seismic Accelerometers", IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 17, NO. 7, APRIL 1, 2017.

к.ф.-м.н. Д.В. ЛИХОДЕЕВ, к.ф.-м.н. Д.А. ПРЕСНОВ,  
д.ф.-м.н. А.Л. СОБИСЕВИЧ, д.т.н. Л.Е. СОБИСЕВИЧ

**О ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТИЧЕКОЙ МАСКИРОВКИ МОРСКИХ МИН**

Рассмотрена и теоретически обоснована принципиальная возможность решения одной из актуальных проблем создания морских мин – обеспечение их акустической незаметности, т. е. маскировки, при использовании резонансных звукопоглощающих систем, размещаемых вблизи корпуса мины. Показана достаточно высокая расчетная эффективность предложения.

Одной из актуальных проблем проектирования морских мин и минных комплексов является обеспечение их скрытности от обзорного обследования акваторий гидроакустическими методами. В данной статье обсуждается возможность противодействия средствам миноискания за счет маскирующего покрытия корпусов морских мин. Такая маскировка возможна за счет размещения вблизи твердой поверхности корпусов морских мин резонансных звукопоглощающих систем. Поглощение части энергии падающей волны такими системами приведет к ослаблению отраженной волны. Очевидно, что в акустическом поле требуется обеспечить возбуждение резонансных колебаний с большой амплитудой, причем колеблющиеся элементы, испытывая трение о вязкую жидкость, будут служить «мостиком» для перекачки энергии акустических колебаний в тепло. Для достижения наибольшего эффекта масса, упругость и диссипативные параметры колебательного элемента должны быть согласованы между собой. Чтобы сформулировать условия согласования, нужно предложить математическую модель элемента и провести соответствующий расчет.

**СТРУННЫЙ МЕХАНИЗМ ДЕМПФИРОВАНИЯ**

Предлагаемая ниже модель есть обобщение модели, рассмотренной в [1], в кото-

рой проведен анализ колебаний малой частицы, погруженной в идеальную жидкость. Акустическая волна в жидкости формирует течение вокруг частицы, в результате чего появляется осциллирующая сила. В соответствии с парадоксом Даламбера-Эйлера сила сопротивления при стационарном потенциальном обтекании должна равняться нулю. Однако для осциллирующего течения, вызванного волной, этот парадокс не имеет места, и тело будет совершать вынужденные колебания.

В нашем случае, в отличие от [1], необходимо учесть упругую реакцию тела, для чего рассмотрим не свободную частицу в жидкости, а малый шар (бусинку), закрепленный на струне (рисунок 1).

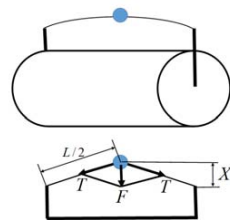


Рисунок 1 – Модель осциллятора

Вектор смещения шарика из положения равновесия обозначим как \$X\_i\$. Уравнение движения тела, имеющего скорость \$\dot{X}\_i\$,

массу \$m\_2\$ и плотность \$\rho\_2 = m\_2 / V\$, записывается так (см., например, [2]):

$$m_2 \ddot{X}_i + \frac{4T}{L} X = m_1 \dot{v}_i - M_{ik} (\ddot{X}_k - \dot{v}_k) + F_i \quad (1)$$

Здесь \$v\_i\$ – скорость жидкости, \$m\_1 = \rho\_1 V\$ – масса жидкости, вытесненной телом, \$\vec{F}\$ – внешняя сила, \$M\_{ik}\$ – тензор присоединенных масс, \$T\$ – натяжение струны длиной \$L\$. Уравнение (1) справедливо, если \$v\_i\$ слабо меняется в пределах размера частицы (при возбуждении акустических колебаний длина волны должна быть много больше, чем размер частицы: \$\lambda \gg R\$). Для простейшего случая сферического тела [2]

$$M_{ik} = \frac{2}{3} \pi R^3 \rho_1 \cdot \delta_{ik} = \frac{1}{2} m_1 \cdot \delta_{ik} \quad (2)$$

В дальнейшем ограничимся рассмотрением частиц сферической формы и решением скалярной задачи. Если плоская волна распространяется вдоль оси \$X\$, шарик будет совершать движение в том же направлении. Скорость его смещения связана с колебательной скоростью жидкости простым соотношением

$$\dot{X}(t) = \frac{3\rho_1}{2\rho_2 + \rho_1} v(t) \quad (3)$$

Когда плотности погруженного тела и жидкости одинаковы, то есть \$\rho\_2 = \rho\_1\$, скорости также равны: \$\dot{X}(t) = v(t)\$. Если плотность у тела больше, чем у жидкости (\$\rho\_2 > \rho\_1\$), оно движется медленнее (\$|\dot{X}| < |v|\$); напротив, менее плотное тело движется быстрее (\$|\dot{X}| > |v|\$).

В вязкой среде на шарик действует сила сопротивления \$F\_R\$ [2], и уравнение (1) с учетом (2) примет вид

$$\left(1 + 2 \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{8T}{LV\rho_1} X = 3 \frac{dv}{dt} - F_R, \quad (4)$$

$$F_R = \frac{9\eta}{\rho_1 R^2} \left(\frac{dX}{dt} - v\right) + \frac{9}{R} \sqrt{\frac{\eta}{\pi\rho_1}} \int \frac{d}{dt} \left(\frac{dX}{dt} - v(\tau)\right) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}$$

Здесь \$\eta\$ – сдвиговая вязкость жидкости, \$V\$ – объем шара, \$F\_R\$ – сила трения, которая есть сумма силы трения Стокса и силы Бассэ.

Учтем вначале лишь стоково трение и запишем (4) в более компактной форме:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} + 2\delta \frac{dX}{dt} + \omega_0^2 X = \frac{3}{\alpha} \frac{dv}{dt} + 2\delta v \equiv f(t) \quad (5)$$

Здесь обозначено:

$$2\delta = \frac{9\eta}{\alpha\rho_1 R^2}, \quad \omega_0^2 = \frac{8T}{\alpha\rho_1 LV}, \quad \alpha = \left(1 + 2 \frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \quad (6)$$

Как известно, из уравнения (5) следует закон изменения энергии \$E\$ колебательной системы:

$$\frac{dE}{dt} = -2\delta \overline{\dot{X}^2} + \overline{f(t)\dot{X}}, \quad (7)$$

$$E = \frac{1}{2} \overline{\dot{X}^2} + \frac{\omega_0^2}{2} \overline{X^2}$$

Черта сверху означает усреднение по периоду колебаний. Первый член в правой части (7) описывает потери энергии за единицу времени, происходящие из-за трения, второй член – приток энергии из акустического поля.

Поскольку нас интересуют потери, вычислим член \$\overline{\dot{X}^2}\$, предполагая зависимости от времени гармоническими:

$$\begin{pmatrix} v \\ X \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} A \\ X_0 \end{pmatrix} \exp(-i\omega t) + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} A \\ X_0 \end{pmatrix} \exp(i\omega t), \quad (8)$$

$$\overline{\dot{X}^2} = \frac{\omega^2}{2} X_0 X_0^* = \frac{A^2}{2} \frac{4\delta^2 \omega^2 + \frac{9}{\alpha^2} \omega^4}{4\delta^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}$$

Интересно рассчитать коэффициент потерь и построить его зависимости от частоты для различных значений параметров колебательной системы

$$K(\omega) = \frac{2\bar{X}^2}{A^2} = \frac{4\delta^2 + \frac{9}{\alpha^2}}{\omega^2 + \left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1\right)^2} = \frac{4\delta^2 Z + \frac{9}{\alpha^2}}{4\delta^2 Z + (\omega_0^2 Z - 1)^2}. \quad (9)$$

Здесь  $Z = \omega^{-2}$ . Видно, что в предельном случае очень низких частот, при  $\omega^2 \rightarrow 0$  получаем  $K \rightarrow 0$ . При точном резонансе  $\omega = \omega_0$  и на высоких частотах  $\omega^2 \rightarrow \infty$  имеем соответственно:

$$K(\omega_0) = 1 + \frac{9}{4} \left( \frac{\omega_0}{\alpha\delta} \right)^2, \quad (10)$$

$$K(\omega \rightarrow \infty) = \frac{9}{\alpha^2}$$

Если шарик плотнее жидкости, то  $\alpha > 3$ ,  $K(\omega_0) > 9/\alpha^2$ , то есть максимум коэффициента потерь существует при любых значениях параметров колебательной системы.

Сделаем оценки, чтобы показать, что предельный случай низких частот мало реален и первым членом в числителе формулы (9) можно пренебречь. Действительно, первый член мал по сравнению со вторым на частотах

$$\omega < \frac{2}{3} \alpha\delta = \frac{3\eta}{\rho_1 R^2}. \quad (11)$$

Полагая плотность равной  $3 \text{ г/см}^3$ , вязкость 4 сантипуаз, радиус шарика 1 см, получим, что низкими будут частоты менее 0.01 Гц, которые в локации не используются. Пренебрегая первым членом в числителе формулы (9), найдем простые формулы для резонансной частоты и максимума коэффициента потерь:

$$\omega_{\text{res}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - 2\left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2}}, \quad (12)$$

$$K_{\text{max}} = \frac{9}{4} \left( \frac{\omega_0}{\alpha\delta} \right)^2 \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2\right)}$$

Более точное выражение для коэффициента потерь можно получить при учете наследственной силы Бассэ во втором уравнении (4). При рассмотрении гармонической внешней силы сила вязкого трения Бассэ вычисляется через интеграл вероятности, таким образом получим следующее выражение для комплексной амплитуды:

$$X_0 = \frac{2\delta A - 3i\omega A\alpha^{-1} - 3(i-1)A\sqrt{\delta\omega\alpha^{-1}}}{(\omega_0^2 - \omega^2) - 2i\delta\omega + 3(i+1)\omega\sqrt{\delta\omega\alpha^{-1}}}. \quad (13)$$

Тогда коэффициент потерь запишется в следующем виде:

$$K(\omega) = \frac{4\frac{\delta^2}{\omega^2} + \frac{9}{\alpha^2} + 18\frac{\delta}{\alpha\omega} + 6\sqrt{\frac{\delta}{\alpha\omega}} \left(2\frac{\delta}{\omega} + \frac{3}{\alpha}\right)}{4\frac{\delta^2}{\omega^2} + \left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1\right)^2 + 18\frac{\delta}{\alpha\omega}Z + 6\sqrt{\frac{\delta}{\alpha\omega}} \left(2\frac{\delta}{\omega} + \frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1\right)} \quad (14)$$

### ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МАСКИРОВКИ

Полученное выражение является достаточно сложным для аналитического исследования, поэтому выполним его анализ численно. Современные средства поиска мин оснащены гидролокаторами, работающими на частотах в десятки кГц. Предложенный осциллятор будет рассеивать падающую акустическую волну с наибольшей эффективностью на резонансной частоте. Сопоставимая частота резонанса в предложенном осцилляторе может быть реализована, например, при следующих параметрах: длина струны  $L = 1$  см, радиус шарика  $R = 0,026$  см, сила натяжения струны  $T = 1$  кН,  $\rho_1 = 1 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_2 = 3 \text{ г/см}^3$ ,  $\eta = 4$  сантипуаз.

На рисунке 2 представлены результаты расчета коэффициента потерь колебательной системы, представляющей собой один шарик, размещенный на струне с учетом действия силы трения Стокса и наследственной силы Бассэ. Учет наследственной силы позволяет незначительно повысить точность

расчета, поэтому для качественных оценок целесообразно использовать более простую формулу, учитывающую только трение Стокса. Как можно видеть на рисунке 2, предложенная система будет эффективно рассеивать поступающую извне энергию в достаточно узкой области вблизи резонансной частоты, которая определяется указанными выше параметрами системы.

Расширение частотного диапазона маскирующей системы может быть достигнуто путем изменения числа шариков, за-

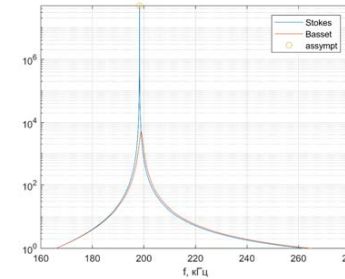


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента потерь от частоты при оптимальных параметрах

### ВЫВОДЫ

Таким образом, струнный механизм демпфирования обеспечивает эффективную маскировку твердого объекта в водной среде. При этом подбором параметров можно добиться требуемой полосы частот маскировки. Полученные в настоящей работе параметры обеспечивают максимальное поглощение энергии в полосе частот

крепленных на струне. Для расчета этого эффекта обратимся к результатам [3], где было получено соответствующее уравнение, положив в нем количество струн на площадь  $N/S_0 = 1$ . На рисунке 3 представлены результаты численного моделирования с параметрами, указанными выше, но для различного количества шариков на струне. Заметим, что увеличение числа шариков на струне приводит к некоторому увеличению эффективности рассеяния энергии, однако в то же время уменьшается полезная полоса частот.

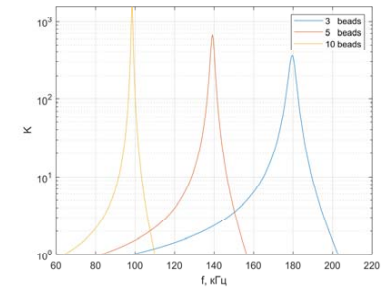


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента потерь от частоты при нескольких шариках

160-190 кГц. Однако для реального применения в технических средствах они требуют более детального анализа с целью обеспечения требуемого коэффициента отражения, близкого к однородной среде. Отметим также, что усложнение колебательной системы путем размещения на одной струне нескольких шариков приводит к увеличению коэффициента потерь.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев-Степанов П.В., Руденко О.В. О затухании звука в жидкости, содержащей взвешенные частицы микро- и нанометровых размеров. // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55. – № 6. – С. 706-711.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986.
3. Руденко О.В., Сарвазян А.П. Волновая биомеханика скелетной мышцы. // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52. – № 6. – С. 833-846.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИКИ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ГЕОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье на примере анализа геодинамических процессов в геосферах Земли развивается технология применения техники адаптивной фильтрации для удаления нежелательных шумов на записях сейсмических приборов.

### ВВЕДЕНИЕ

Полнота знаний о процессах, происходящих на Земле, включая моря и океаны, во многом зависит от корректных инструментальных наблюдений. Многообразие изучаемых явлений предполагает необходимость исследований в широчайшем частотном диапазоне. В связи с этим на сегодняшний день одной из важных проблем в геоакустике является параметрическое улучшение аппаратуры, включающее в себя увеличение разрешающей способности приборов, расширение их частотного и динамического диапазонов. Получение качественных цифровых записей представляет собой серьезную технологическую проблему. В первую очередь это обусловлено приближением разрешения приборов к физически достижимому пределу. Кроме этого, на пути повышения чувствительности датчиков появляются различного вида помехи. При этом теоретический анализ влияния внешней среды на приборы зачастую весьма затруднителен, а его характер неоднозначен, трудно интерпретируем, изменчив при переходе от одного места наблюдения к другому и от экземпляра к экземпляру одного и того же инструмента. Однако если мы будем считать систему суммативной, то можно будет рассматривать все виды помех по отдельности, а также попытаться оценить и снизить их влияние.

Сейчас существует много работ, посвященных аналитическим и экспериментальным исследованиям влияния окружающей среды на уровень инструментальной

помехи [1, 2, 3]. В качестве наиболее полных работ, которые могут быть использованы при оценке уровня шума приборов, следует обязательно упомянуть труды А.В. Рыкова [4-11], Э. Виланда (E. Wielandt) [12-15], В.Д. Феофилактова [16, 17], Е.М. Линькова [18-21]. Однако в них, как правило, рассматриваются конкретные приборы или их элементы и отдельные помехогенные факторы. На рабочем совещании группы экспертов в Альбукерке (США) [22] особенное внимание было уделено чувствительности параметров приборов к изменениям в окружающей среде. Предполагалось определить способы учета воздействий температуры, давления, влажности, уровня грунтовых вод, дождевых потоков, магнитных полей, электромагнитных помех, ударов и вибраций, акустического шума, молнии, коррозии и излучения ядерного взрыва. К сожалению, в полной мере цель не была достигнута. Такое повышенное внимание ведущих специалистов к воздействию окружающей среды на сейсмические приборы, несомненно, было вызвано результатами этих воздействий. Так, например, помеховый сигнал на сейсмической записи может в некоторых случаях на порядки превышать полезный сигнал, регистрируемый на той же частоте (рисунок 1). При этом собственные шумы сейсмических приборов могут различаться на два и более порядка при небольших отличиях их конструкций. Таким образом, главным препятствием в использовании широкополосной сейсмической аппаратуры являются разного рода помехи, мощность и воздействие которых на прибор возрастают

по мере расширения его частотной характеристики в область длинных периодов. Однако, анализируя комплексное влияние помехогенных факторов и каналов проникновения помех на любую сейсмическую запись, путем определенных математических операций можно существенно улучшить

метрологические характеристики приборов и, соответственно, их записи. Мы же в этой статье не будем рассматривать вопрос борьбы с шумами столь широко и ограничимся рассмотрением вопроса применения адаптивной фильтрации для улучшения качества сейсмических записей.

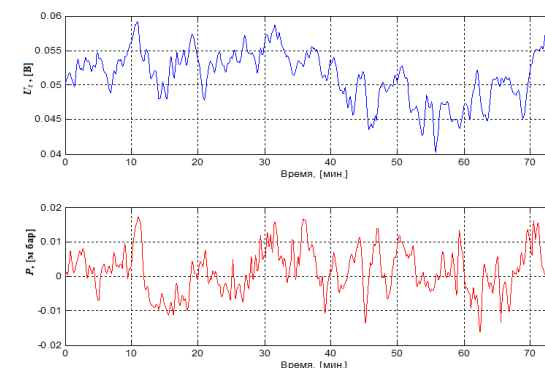


Рисунок 1 – Образец записи ветровых колебаний атмосферного давления (нижний график) и вызванных ими наклонов грунта (верхний график)

### ПРОНИКНОВЕНИЕ ПОМЕХ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЗАПИСИ

Проникновение основного класса помех на сейсмическую запись любого сейсмологического прибора проиллюстрировано на рисунке 2. На этой схеме  $X(t)$  представляет собой полезную составляющую

движений грунта, или «чистый» сейсмический сигнал,  $T(t)$  и  $P(t)$  характеризуют составляющие инструментального шума, вызванные изменениями окружающей температуры и давления,  $H(f)$  – передаточная функция сейсмического прибора и, наконец,  $Y(t)$  – данные, получаемые на итоговой записи.

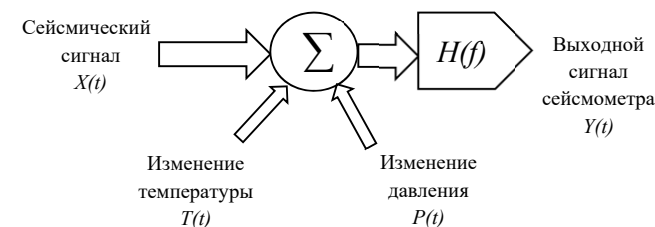


Рисунок 2 – Упрощенная схема проникновения помехи на сейсмическую запись



При этом надо понимать, что, кроме полезного сигнала, например от землетрясения, перемещение грунта  $X(t)$  может также включать в себя компоненты сейсмических помех, возникающих из-за антропогенного воздействия, уровня грунтовых вод [20], резонансных явлений [23], усадки бетона постаментов и грунта под ним [3], а также наведенные помехи, генерируемые изменениями физических полей, но только при их воздействии непосредственно на элементы датчиков и каналы связи, включая собственный шум («дрожание системы») [24], шум аналого-цифрового преобразования [25] и т. д. Передаточная функция сейсмического датчика  $H(f)$  тоже не является постоянной величиной и может изменяться во времени, иногда весьма значительно, при изменении условий окружающей среды [3, 6].

Наибольшее влияние на любую сейсмическую аппаратуру оказывают помехи, связанные с колебаниями атмосферного давления (рисунок 1 и 3) и температуры, как передающиеся через грунт, так и непосредственно действующие на приборы. Для уменьшения или исключения подобных влияний используются различные методы. Рассмотрим далее один из них – адаптивную фильтрацию. В научной литературе многократно указывалось, что ветер является одной из наиболее значительных помех от генерирующих факторов [26, 27, 28, 29]. Установлено, что коэффициент корреляции между средней скоростью ветра и давлением во временном интервале 10-50 секунд равен или превышает 0,8. Такая высокая корреляция привела к тому, что многие исследователи игнорируют

влияние ветра на генерацию помех, рассматривая лишь изменения атмосферного давления, а скорость ветра считают скалярной величиной [30]. А между тем явная направленность как среднего ветра, так и порывов [31] требуют рассмотрения не вопроса взаимосвязи ветра и давления, а проблемы генерации сейсмической помехи ветром, поскольку направление и скорость ветра не определяются однозначно только градиентом давления [32]. Кроме этого, любое препятствие, оказывающееся на пути ветра, будет как-то на него влиять и возмущать поле ветра. Такие препятствия могут быть крупномасштабными, такими как горные хребты, и мелкомасштабными, как здания, деревья, лесные полосы и т. д. Соответственно, возникают зоны усиления ветра и зоны ветровой тени. Перед препятствием и за ним иногда могут появляться так называемые наветренные и подветренные вихри. В результате трения воздуха о земную поверхность, удары в препятствия создается очень сложная картина сейсмических шумов, которая, естественно, имеет свои особенности для каждой сейсмостанции [33]. Взаимодействие ветра с препятствиями, особенно зданиями и сооружениями, может также вызвать такие явления, как бафтинг, флаттер и т. п. В результате возможно генерирование интенсивных шумовых сейсмических волн [34]. При определенной силе и направлении ветра в спектре сейсмического сигнала возникают вызванные этими явлениями шумовые сигналы, которые при использовании техники адаптивной фильтрации могут быть весьма успешно отфильтрованы [35, 36].

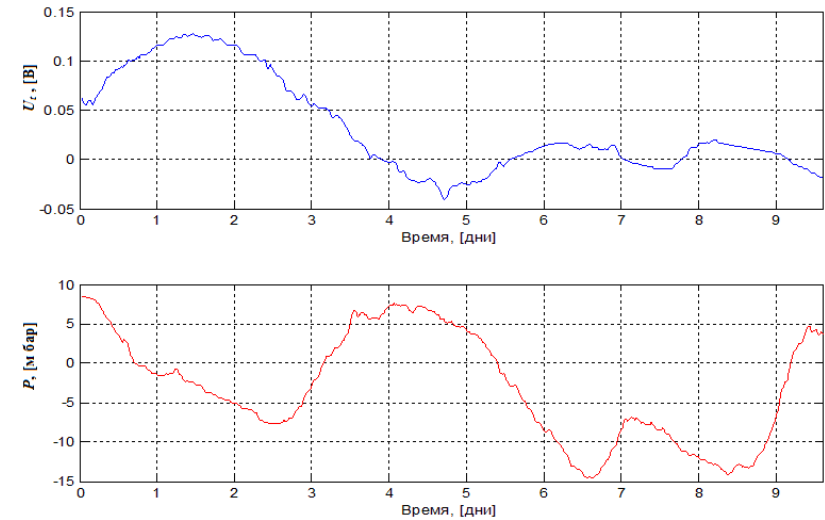


Рисунок 3 – Параллельная запись колебаний атмосферного давления (нижний график) и наклонов почвы (верхний график) при прохождении атмосферного фронта

### АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Рассмотрим теперь подробнее непосредственно адаптивную фильтрацию и способы ее применения для выделения полезных, или «чистых» сейсмических сигналов. Если говорить кратко, то адаптивная фильтрация основана на использовании, помимо исходного зашумленного сейсмического сигнала, одного или нескольких сигналов помехи, коррелированных или слабо коррелированных с полезным сигналом. В настоящее время адаптивная фильтрация может быть довольно легко практически реализована благодаря появлению высокопроизводительных компьютеров, специальных программируемых микроконтроллеров и других изделий микроэлектроники. Адаптивная фильтрация отличается от классического цифрового фильтра наличием обратной связи и, следовательно, передаточной

функции фильтра переменной во времени, которая зависит напрямую от подаваемых сигналов. Ее типичной областью применения обычно бывает решение задачи очистки сигналов от любых нестабильных мешающих сигналов и шумов в случае, когда их спектральный состав практически полностью перекрывается со спектром полезного (искомого) сигнала или когда спектр шумовых сигналов заранее не известен и может изменяться во времени. Рассмотрим простейший вариант адаптивного фильтра, удовлетворяющего условиям линейной фильтрации, когда сейсмический сигнал  $X(k)$  и помеха  $P(k)$  представляют собой два стационарных взаимно коррелированных процесса, а критерием оптимальности фильтра будем считать минимум среднеквадратичной ошибки. Структурная схема подобного фильтра представлена на рисунке 4.

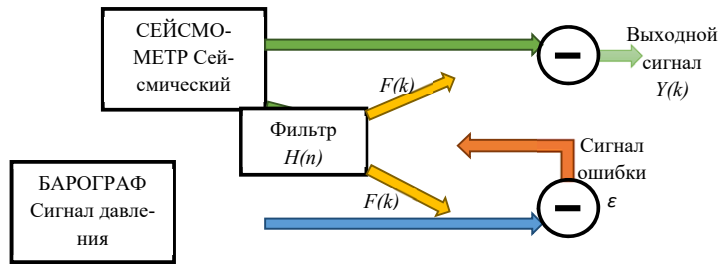


Рисунок 4 – Упрощенная структурная схема адаптивного фильтра фильтрации барических помех

На входы фильтра  $H(n)$  приходят в цифровом виде записанные массивы двух аналоговых сигналов:  $X(k)$  – от сейсмометра,  $P(k)$  – от барографа. Оба сигнала нормированы и синхронизированы по времени. В этом случае сигнал с сейсмометра можно представить в виде суммы непосредственно «чистого» сейсмического сигнала  $S(k)$ , наведенной помехи  $Sp(k)$  и непосредственно сейсмического шума  $N(k)$ :

$$X(k) = S(k) + Sp(k) + N(k) = Sn(k) + Sp(k),$$

где  $Sn(k)$  – сейсмический сигнал с шумовой составляющей. Наведенная помеха  $Sp(k)$  имеет непосредственную связь с сигналом барической помехи  $P(k)$ , то есть их взаимная корреляционная функция  $Csp(k, k')$  не равна нулю

$$Csp(k, k') = \langle Sp(k), P(k') \rangle > 0.$$

Как уже было отмечено ранее, при совпадении спектрального состава сейсмического сигнала  $X(k)$  и барического  $P(k)$  выделение полезного сигнала методами линейной фильтрации обычно оказывается нерешаемой задачей [37]. Однако, используя адаптивный фильтр, можно успешно отфильтровать большую часть помеховой составляющей. При этом выходной сигнал  $F(k)$  фильтра  $H(n)$ , который обозначен на рисунке 4 стрелками желтого цвета,

$$F(k) = H(n) \cdot X(k - n)$$

будет отличаться от  $P(k)$  на величину

$$\varepsilon = F(k) - P(k),$$

которая характеризует сигнал ошибки и является абсолютным значением погрешности воспроизведения сигнала по отсчетам  $k$ . В качестве одного из возможных вариантов программной реализации фильтра  $H(n)$  можно использовать оптимальный фильтр Колмогорова-Винера [38]. В этом случае критерий оптимизации будет соответствовать критерию минимума среднеквадратического отклонения

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{[F(k) - P(k)]^2},$$

что даст возможность определить коэффициенты фильтра  $H(n)$ . Черта сверху означает усреднение ошибки отклонения по всем значениям. Далее из разности исходных данных  $X(k)$  и выхода оптимального фильтра  $F(k)$  получим полезный сейсмический сигнал  $Y(k)$ :

$$Y(k) = X(k) - F(k) = X(k) - H(n) \cdot X(k - n).$$

При подстановке в уравнение критерия оптимизации формулы выходного сигнала оптимального фильтра отклонение  $\varepsilon^2$  сигнала  $Y(k)$  от заданной формы выходного сигнала фильтра по всем точкам массива данных будет равно

$$\overline{\varepsilon^2} = \overline{\left( \sum_n H(n) \cdot X(k - n) - P(k) \right)^2}.$$

Как было сказано ранее, минимум данного выражения будет определять коэффициенты оптимального фильтра. Чтобы их найти, продифференцируем его по коэффициентам фильтра и приравняем полученные уравнения нулю

$$\frac{d(\varepsilon^2)}{dH(n)} = \sum_n H(n) \cdot X(k - m) \cdot X(k - n) - \overline{P(k) \cdot X(k - m)} = 0,$$

где  $\overline{X(k - m) \cdot X(k - n)} = C_{XX}(m - n)$  является корреляционной функцией входного сигнала, а  $\overline{P(k) \cdot X(k - m)} = C_{XP}(m)$  – взаимной корреляционной функцией входного и помехового сигналов  $P(k)$  и  $X(k)$ . Далее получаем

$$\frac{d(\varepsilon^2)}{dH(n)} = \sum_n H(n) \cdot C_{XX}(m - n) - C_{XP}(m)$$

$$\sum_n H(n) \cdot C_{XX}(m - n) = C_{XP}(m)$$

для  $n = m$  это порядок фильтра (0,1,2,3,...). То есть критерий оптимальности будет соответствовать равенству свертки функций

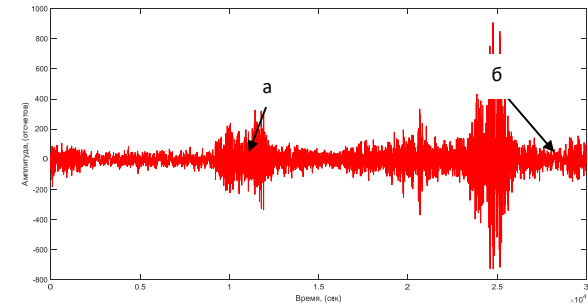


Рисунок 5 – Фрагмент записи вертикальной компоненты сейсмометра, установленного в глубине штольни сейсмической станции Mombach (Бельгия), на котором присутствует сигнал от двух землетрясений. Первое землетрясение (а) магнитудой  $M = 4,2$  с очагом на глубине 10 км произошло 01 октября 2009 года в регионе Tonga (15.309°S 173.312°W) в 04:42:18 (UTC), и затем через 8 минут 5 секунд примерно в том же районе случилось более сильное землетрясение (б) тоже с очагом на глубине 10 км и магнитудой 4,5.

отклика оптимального фильтра автокорреляции входного сигнала с функцией взаимной корреляции выходного и входного сигналов. Данное выражение может быть реализовано в виде системы линейных уравнений для фиксированных значений координаты  $m$  коэффициентов фильтра. Решение такой системы уравнений относительно значений  $H(m)$  даст искомые коэффициенты, формирующие передаточную характеристику оптимального фильтра.

В качестве практического примера использования подобного адаптивного фильтра рассмотрим выделение сигналов двух удаленных землетрясений, произошедших в регионе островов Tonga, магнитудами порядка  $M = 4,2-4,5$ , записанных на сейсмической станции Mombach, принадлежащей королевской обсерватории Бельгии. Расстояние от точки регистрации до эпицентров землетрясений составляет около 16165 км по поверхности Земли. На рисунке 5 представлен фрагмент сейсмической записи вертикальной компоненты, включающий сигналы двух землетрясений, с сейсмометра, установленного в помещении в глубине штольни, вырубленной в массиве гранита, на расстоянии более 40 метров от входа в штольню.

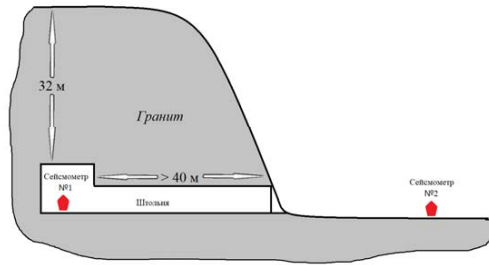


Рисунок 6 – Схема расположения сейсмометров во время эксперимента

Так удачно совпало, что в то же самое время рядом с штормой Метбаш мы проводили работы по записи сейсмических сигналов с помощью аналогичного сейсмометра, установленного просто на поверхность грунта. Схематичное расположение сейсмометров показано на рисунке 6, где сейсмометр № 1 установлен внутри штормы, а сейсмометр № 2 снаружи. Соответственно, сейсмометр № 2 подвергся дополнительному влиянию многих помехогенерирующих факторов, основным из которых было короткопериодное изменение атмосферного давления ввиду ветреной погоды. Фрагмент записи с этого сейсмометра, на котором также присутствует сигнал этих землетрясений, показан на рисунке 7. На рисунке хорошо видно, что сигнал от землетрясений оказался сильно маскирован сигналами барических помех. Одновременно с записью сейсмических сигналов

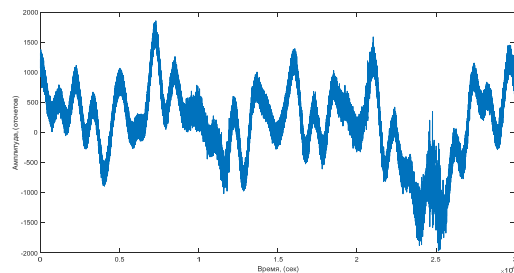


Рисунок 7 – Фрагмент записи вертикальной компоненты сейсмометра (соответствующий фрагменту рисунка 5), установленного вне штормы на поверхности грунта

также проводилась запись изменений значений атмосферного давления с электронного микробарографа. Таким образом, у нас появилась возможность с помощью адаптивной фильтрации выделить «правильный» сейсмический сигнал и сравнить его с записью произведенной внутри закрытой штормы, где перепады температуры и давления были сведены к минимуму. Результат адаптивной фильтрации представлен на рисунке 8. Для того чтобы визуально сравнить полученные результаты, построим на одном графике запись с сейсмометра из штормы вместе с результатом фильтрования (рисунок 9). Хорошо видно, что, несмотря на наличие на исходном сигнале (рисунок 7) значительного уровня помех, удалось с небольшими ошибками восстановить сейсмический сигнал, непосредственно связанный только с сейсмическими событиями (землетрясениями).

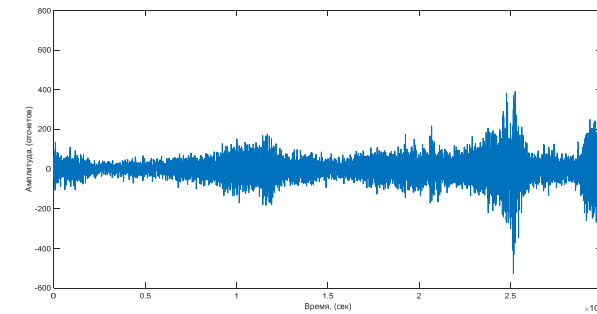


Рисунок 8 – Результат работы адаптивного фильтра

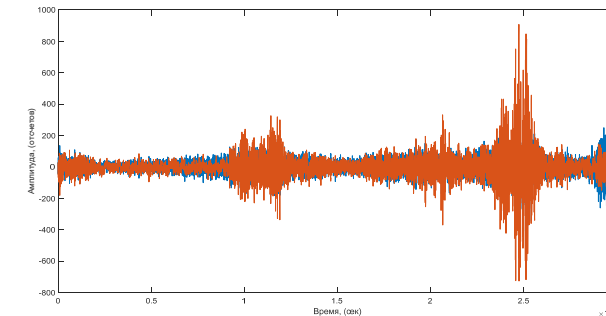


Рисунок 9 – Сравнение результата работы адаптивного фильтра (синий) с записью сейсмометра, установленного внутри штормы (красным)

## ВЫВОДЫ

В результате проведенных работ было практически доказано, что применение техники адаптивной фильтрации делает возможным восстановление «чистого» сигнала. Примененный адаптивный фильтр учитывает ключевые особенности подаваемого на его входы спектрального состава сигналов. Он способен формировать передаточные функции, обеспечивающие выделение «полезных» частот сигналов из любых диапазонов спектра с максимальным подавлением шумов, представленных во втором опорном входном сигнале соответствующим сигналом помехи, на всех частотах спектрального диапазона [38]. При этом

границы усиления-подавления фильтра формируются автоматически по заданному уровню шумов. Аналогичным образом можно проводить фильтрацию исходных сейсмических и геогидроакустических сигналов с учетом как внешней, так и внутренней температуры прибора [39, 40]. Наиболее критичными к таким проявлениям изменениям температур оказываются сейсмические наклонометры, так как для их корректной работы необходимо поддержание постоянства окружающей температуры порядка сотых долей градуса, что практически трудно реализуемо.

Таким образом, адаптивная фильтрация представляет собой важнейший резерв

повышения разрешающей способности широкополосной сейсмометрии. Необходимость расширения геоакустических и сейсмометрических исследований в область низких и сверхнизких частот ставит перед учеными и исследователями ряд не только узкотехнических, но и общеметодологических проблем.

Их дальнейшее изучение неизбежно приведет к модернизации технических средств, совершенствованию методик, а также развитию алгоритмов обработки сигналов, что в совокупности позволит с наибольшей эффективностью решать задачи получения качественных данных в конкретных условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Башилов И.П., Дараган С.К., Кабыченко Н.В. Шумовые параметры сейсмических приборов // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 2002. – Вып. 2. – С. 19-29.
2. Кислов К.В. Влажность как помехообразующий фактор в сейсмометрии // Естественные и технические науки. – 2008. – № 6 (38). – С. 161-162.
3. Кислов К.В., Гравиров В.В. Исследование влияния окружающей среды на шум широкополосной сейсмической аппаратуры // Вычислительная сейсмология. Вып. 42. – М.: Красанд, 2013. – 240 с.
4. Рыков А.В. Астизирование сейсмометра с помощью отрицательной обратной связи // Сейсмические приборы. Вып. 14. – М.: Наука, 1981. – С. 3-5.
5. Рыков А.В. Задачи метрологии широкополосной сейсмической аппаратуры // Сейсмические приборы. Вып. 27. – М.: ОИФЗ РАН, 1997. – С. 66-76.
6. Рыков А.В. Моделирование сейсмометра. – М.: Изд-во ОИФЗ РАН, 1996. – 109 с.
7. Рыков А.В. Представление электронного сейсмометра с помощью собственных частот // Сейсмические приборы. Вып. 27. – М.: ОИФЗ РАН, 1997. – С. 39-42.
8. Рыков А.В. Сейсмометр и колебания Земли // Физика Земли. – 1992. – № 2. – С. 76-80.
9. Рыков А.В., Башилов И.П. Сверхширокополосный цифровой комплект сейсмометров // Сейсмические приборы. Вып. 27. – М.: ОИФЗ РАН, 1997. – С. 3-6.
10. Рыков А.В., Марченков А.Ю. Моделирование сейсмометра в области его неустойчивости // Сейсмические приборы. Вып. 24. – М.: Наука, 1993. – С. 90-95.
11. Рыков А.В., Марченков А.Ю. Сейсмометр с обратными связями на примере сейсмометра Виланда // Сейсмические приборы. Вып. 23. – М.: Наука, 1992, с. 54 – 58.
12. Wielandt E., Stein J.M. A digital very-broad-band seismograph // *Annals Geophysicae*. Ser. B. – 1986, Vol. 4, № 3, pp. 227 – 232.
13. Wielandt E., Streckeisen G. The leaf-spring seismometer – design and performance // *BSSA*. – 1982, Vol. 72, pp. 2349 – 2367.
14. Wielandt E. Common seismic sensors. Datasheet DS 5.1 in: Bormann, P. (Ed.) (2012). *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2. urn:nbn:de:kobv:b103-NMSOP-2.-10 p.
15. Wielandt E. Noise in electronic seismograph systems // *Zeitschrift für Geophysik*, 1973, Band 39, 597-602.
16. Феофилактов В.Д. Помехи в длиннопериодной сейсмометрии. – М.: Наука, 1977. – 100 с.
17. Феофилактов В.Д. Шумы вертикальных сейсмометров. – М.: Наука, 1972. – 69 с.
18. Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Дунаев А.В. Наблюдения длиннопериодных колебаний Земли горизонтальным сейсмометром на антинаклонной платформе // Сейсмические приборы. Вып. 21. – М.: Наука, 1990. – С. 90-96.
19. Линьков Е.М. Сейсмические явления. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 248 с.
20. Линьков Е.М. Супердлиннопериодный горизонтальный сейсмометрический канал // Сейсмические приборы. Вып. 23. – М.: Наука, 1992. – С. 48-53.
21. Линьков Е.М., Типисев С.Я., Буценко В.В. Помехоустойчивость длиннопериодного сейсмографа и анализ его записей // Геофизическая аппаратура. Вып. 75. – Л.: Недра, 1982. – С. 78-87.
22. Hutt C.R., Nigbor R.L. and Evans J.R., eds., 2009, *Proceeding of the guide lines for seismometer testing workshop*, Albuquerque, New Mexico, 9–10 May 2005 (“GST2”): USGS Open-File Report, 2009 – 1055, 48 p.
23. Чернов В.В., Гушин В.В. Особенности установочного резонанса сейсмических приборов // Материалы Пятой научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.А. Андропова. 7 мая 2001 г. Нижний Новгород. – Н.Новгород: ННГУ, 2001. – С. 252-253.
24. Колесников Ю.А., Мацневский С.А. Шумы вертикальных длиннопериодных сейсмометров и методы их уменьшения // *Вычислительная сейсмология*. Вып. 12. – М.: Наука, 1979. – С. 125-144.
25. Ruscak S., Singer L. Using Histogram Techniques to Measure A/D Converter Noise // *Analog Dialogue*. – 1995, Vol. 29-2, pp. 7-8.
26. Адушкин В.В., Харламов В.А., Рыбнов Ю.С. Характеристика инфразвукового фона на станциях Дубна и Залесово // *Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие*. (Геофизика сильных возмущений): Сборник научных трудов. – М.: ИДГ РАН, 1999. – С. 166-175.
27. Tmkoczy A., Bormann P., Hanka W., Holcomb L.G., Nigbor R.L. Site Selection, Preparation and Installation of Seismic Stations. Chapter 7 in: Bormann, P. (Ed.) (2012). *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2. urn:nbn:de:kobv:b103-NMSOP-2. – 108 p.
28. Withers M.M., Aster R.C., Young C.J., and Chael E.P. High-frequency analysis of seismic background noise as a function of wind speed and shallow depth // *BSSA*. – 1996, Vol. 86(5), pp. 1507-1515.
29. Beauduin P., Lognonne P., Montagner J., Cacho S., Karczewski J., and Morand M. The effects of atmospheric pressure changes on seismic signals, or how to improve the quality of a station // *BSSA*. – 1996, Vol. 86, pp. 1760-1799.
30. Колесников Ю.А., Токзес М.Н. Уменьшение чувствительности вертикальных сейсмометров к колебаниям атмосферного давления // *Вычислительная сейсмология*. Вып. 14. – М.: Наука, 1982. – С. 183-188.
31. Гравиров В.В. Методы уменьшения помех сейсмического гироаклонометра. Дисс. ...канд. физ.-мат.н. – М., 2009. – 120 с.
32. Кислов К.В. Теория и методы защиты широкополосных сейсмометров от воздействий окружающей среды. ...канд. физ.-мат. н. – М., 2009. – 171 с.
33. Гравиров В.В. Экспериментальные результаты регистрации наклонов почвы атмосферного происхождения гироаклонометром типа KST-1 // *Естественные и технические науки*. – 2008. – Т. 38. – № 6. – С. 159-160.
34. Douze E.J., Sorrells G.G. Prediction of Pressure-Generated Earth Motion Using Optimum Filters // *BSSA*. – 1975, Vol. 65(3), pp. 637-650.
35. Kislou K.V., Gravirov V.V. and Labuncov M. The Analysis of Wind Seismic Noise and Algorithms of Its Determination // *Eos Trans. AGU, Fall Meet. Suppl., Abstract S21C-2079*, San Francisco, USA, 2010.
36. Леонтьев В.И. Методы и способы повышения точности гравинерциальной аппаратуры. Дисс. ...канд. физ.-мат.н. – М., 2003.
37. Orfanidis S.J. *Optimum Signal Processing. An Introduction*. 2nd Edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
38. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульдц М.М. *MATLAB 7: программирование, численные методы*. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 742 с.
39. Гравиров В.В. Программа адаптивной фильтрации сейсмического сигнала с учетом температурного режима сейсмометра / Свидетельство регистрации прав на ПО № 2019665143 от 20 ноября 2019 г.
40. Гравиров В.В., Кислов К.В. Программа подстраиваемого оптимального фильтра (Slave\_Opt\_Filter) / Свидетельство регистрации прав на ПО № 2017661235 от 6 октября 2017 г.

к.т.н. В.П. ДМИТРИЧЕНКО, к.т.н. Б.Г. КАЛМИНСКИЙ

### ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК МАЛОГАБАРИТНЫМИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ БУЯМИ

В статье рассмотрены результаты расчетной оценки потенциально достижимой дальности обнаружения подводных лодок активными малогабаритными гидроакустическими буйами с использованием пьезокерамических излучателей.

Одной из хорошо отработанных и широко используемых, особенно авиацией ВМФ, является технология поиска подводных лодок (ПЛ) с использованием мобильных быстро развертываемых си-

стем освещения подводной обстановки, основными элементами которых являются автономные многофункциональные гидроакустические буйи (ГАБ). Вариант формирования такой системы представлен на рисунке 1.

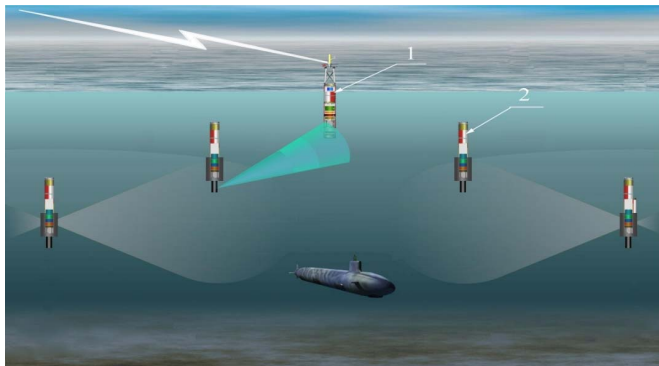


Рисунок 1 – Мобильная быстро развертываемая система освещения подводной обстановки

Развертывание такой системы ГАБ в районе вероятного или предполагаемого местонахождения цели может происходить с самых разных носителей. Наряду с противолодочной авиацией в качестве средства доставки ГАБ в район первичного обнаружения ПЛ цели могут использоваться ракетные комплексы [1] или беспилотные летательные аппараты. Такие быстро развертываемые системы обеспечивают решение задачи поиска ПЛ вероятного противника в удаленных акваториях с максимальной оперативностью.

Гидроакустические буйи в составе такой системы должны функционировать как автономные гидроакустические комплексы, обеспечивающие обнаружение и уточнение местоположения ПЛ (дистанция, пеленг, глубина) в автоматическом режиме в условиях жесткого ограничения их массогабаритных характеристик. Поскольку ГАБ представляют собой устройства одноразового действия, к ним предъявляются требования обеспечения не только малых весов и габаритов, но и минимальной стоимости.

Передача информации о местоположении ПЛ цели и параметрах ее движения может передаваться в систему управления средствами поражения по радио- или гидроакустическому каналу связи.

Очевидно, что эффективность применения системы зависит от эффективности рабочих характеристик ГАБ. Успехи кораблестроителей в области постоянного снижения шумности подводных лодок привели к тому, что проблема обнаружения и пеленгования ПЛ пассивными методами достигла в настоящее время критического состояния, а дальность обнаружения ПЛ пассивными методами применительно к ГАБ не обеспечивает выполнение постоянно возрастающих требований заказчика.

Учитывая тот факт, что тенденция снижения уровня шумности ПЛ сохранится и в будущем, следует уже сейчас искать пути восполнения боевой эффективности ГАБ и, как следствие, всей системы освещения подводной обстановки. Поэтому в ГАБ, помимо пассивного метода обнаружения, вынужденно используется и активный (гидролокационный) метод целеуказания.

При этом накладываемые на массу и размеры ГАБ ограничения приводят к необ-

ходимости принятия компромиссного решения между уменьшением массогабаритных характеристик ГАБ и увеличением дистанции целеуказания. В этой связи представляет интерес оценка потенциальной возможности активного малогабаритного ГАБ по поиску и обнаружению ПЛ-цели.

Для решения поставленных задач рассмотрим ГАБ, в состав которого входят (рисунок 2):

- 1 – широкополосное излучающее устройство активного тракта обнаружения и целеуказания, тракта приема/передачи;
- 2 – приемная антенна тракта обнаружения и целеуказания, выполненная в виде цилиндрической фазированной решетки;
- 3 – источники питания;
- 4 – вторичный источник питания;
- 5 – генераторное устройство;
- 6 – блок управления;
- 7 – гидроакустический тракт обнаружения и целеуказания пассивно-активным методом;
- 8 – гидроакустический тракт приема/передачи информации в режиме адаптивной телетайпной скрытой связи.

Возможные габариты ГАБ показаны на этом же рисунке.

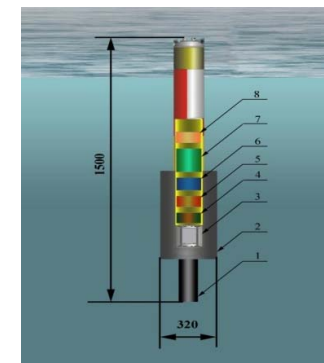


Рисунок 2 – Модификация ГАБ



Ниже представлены результаты расчета потенциально достижимой дистанции обнаружения ПЛ цели при работе ГАБ в активном режиме.

При оценке потенциально достижимой дальности обнаружения необходимо учитывать требования, предъявляемые к ГАБ, в частности его массогабаритные характеристики. Именно массогабаритные характеристики ГАБ являются одними из ключевых, поскольку ими определяется возможность размещения развитых приемно-излучающих систем, допустимые масса и габариты электронной аппаратуры, энергоемкость источников питания.

При проведении расчетов дальности действия гидролокатора следует иметь в виду, что дальность имеет максимальное значение (при некоторых заданных условиях распространения и характеристиках цели) на определенной частоте, называемой оптимальной. Оптимальная частота является функцией дальности обнаружения и

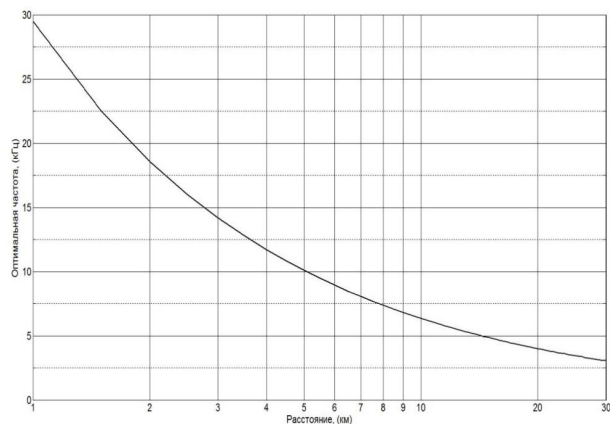


Рисунок 3 – Зависимость оптимальной частоты от дальности обнаружения

Из графика, представленного на рисунке 3, видно, что при известном наборе параметров среды, цели и аппаратуры гидролокатора значение оптимальной частоты уменьшается с увеличением требуемой

определенного набора параметров среды, цели и аппаратуры гидролокатора и в первом приближении может быть определена в соответствии с выражением [2]:

$$f_{\text{опт}} \cong \frac{29.5}{R^{\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

где  $R$  – заданное значение дальности обнаружения.

Данная формула справедлива при следующих допущениях:

- коэффициент помехоустойчивости антенны пропорционален квадрату частоты;
- спектры сигнала и помехи имеют одинаковый закон зависимости от частоты.

На рисунке 3 представлен график зависимости оптимальной частоты от расстояния, рассчитанной в соответствии с выражением (1).

дальности обнаружения. Так, для дальности обнаружения 5 км оптимальной является частота 10 кГц, в то время как для дальности обнаружения 20 км оптимальной является частота 4 кГц. Эти значения оптимальной

частоты будут положены в основу предварительной оценки потенциальных возможностей обнаружения подводных лодок ГАБ.

Независимо от способа обработки информации оценка дальности обнаружения и целеуказания может быть определена решением уравнения, связывающего параметры, определяемые характеристиками цели, среды и аппаратуры.

Параметрами активной гидролокации являются:

- порог обнаружения (ПО), обеспечивающий заданные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги;
- уровень помех (УП), помехи реверберации;
- сила цели (СЦ);

– показатель направленности приемной системы ( $\text{ПН}_{\text{пр}}$ );

– потери при распространении (ПР), которые могут быть определены в соответствии со следующим выражением (при сферическом расширении фронта волны) [3]:

$$\text{ПР} = 20 * \log R + 0.001 * \alpha * R, \quad (2)$$

где  $R$  – дистанция обнаружения (м);

$\alpha$  – километрическое затухание (дБ/км),

$$\alpha = \frac{0.11 * f^2}{1 + f^2} + \frac{44 * f^2}{4100 + f^2} + 3 * 10^{-4} * f^2. \quad (3)$$

На рисунке 4 представлены графики потерь распространения в зависимости от расстояния и частоты.

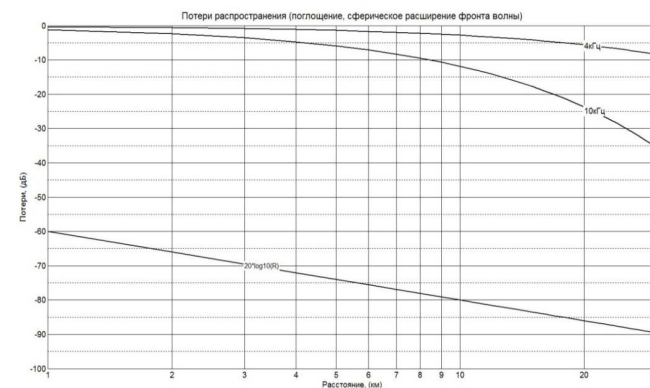


Рисунок 4 – График потерь распространения

Уравнение активной гидролокации, связывающее эти параметры, имеет вид [3]:

$$\text{УИ} = \text{ПО} + 2 * \text{ПР} + \text{УП} - \text{СЦ} - \text{ПН}_{\text{пр}}. \quad (4)$$

Результаты расчета уровней излучения для оптимальной частоты 4 кГц и

10 кГц, полученные в соответствии с выражением (4), представлены в виде графиков на рисунке 5. Расчеты проведены для 50% вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги 0.01%.

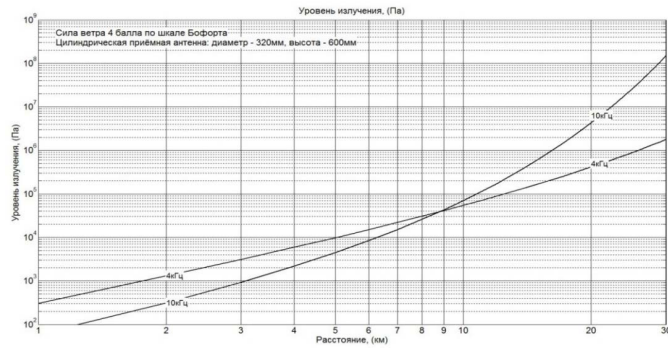


Рисунок 5 – Графики зависимости уровня излучения от расстояния для частот 4 и 10 кГц

Уровень излучения излучателя связан с излучаемой им акустической мощностью и определяется следующим выражением [3]:

$$UI = 107.8 + 10 \cdot \log_{10}(P) + ПН_T \quad (5)$$

где P – акустическая мощность (Вт);

ПН<sub>T</sub> – показатель направленности излучателя.

Результаты расчета акустической

мощности для частоты 4 кГц и 10 кГц, полученные в соответствии с последним выражением, представлены в виде графиков на рисунке 6.

Расчеты проведены для излучателей в виде кольца диаметром 300 мм (4 кГц) и 120 мм (10 кГц) с показателем направленности ПН<sub>T</sub> ≅ 4дБ

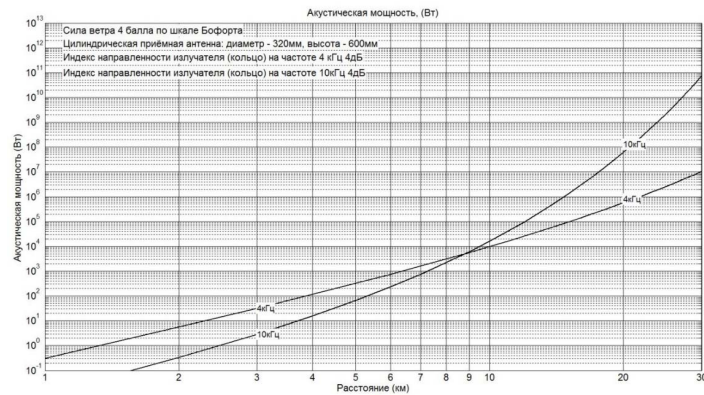


Рисунок 6 – Графики зависимости расчетной акустической мощности ГАБ от расстояния для обнаружения ПЛ-цели на частотах 4 и 10 кГц

Уровень излучения в малогабаритных активных ГАБ с использованием пьезо-керамических секционированных цилиндров ограничивается допустимыми удельными акустическими мощностями.

Согласно рисунку 6, для обеспечения дальности обнаружения ПЛ-цели около 9 км требуется акустическая мощность порядка 5-6 кВт. Для излучения такой мощности с учетом допустимой удельной акустической мощности потребуется площадь поверхности излучающих цилиндров около 830-1000 см<sup>2</sup>, что может быть реализовано на цилиндрах в пределах выбранного диаметра при их высоте до 30 см. Использование в малогабаритных ГАБ излучателей с большими размерами является проблематичным. Кроме того, учетом КПД цилиндрических излучателей, который, как правило, не превышает 40%, создание генераторного устройства с выходной электрической мощностью 12-15 кВт в габаритах ГАБ не представляется возможным.

Рассмотрение возможности обеспечения еще больших дистанций обнаружения применительно к малогабаритным ГАБ представляется нецелесообразным. Так, если оценить возможность локализации ПЛ-цели в акватории радиусом до 20 км при использовании единого излучателя в центре акватории, то требуемая мощность излучения возрастет до фантастических для ГАБ значений в десятки мегаватт, не говоря уже о непомерном увеличении размеров излучателей для таких мощностей. Очевидно, что применительно к малогабаритным буям использование таких мощностей и излучателей практически невозможно.

Представленная ориентировочная оценка потенциальных возможностей обнаружения ПЛ-цели показывает, что применительно к малогабаритным активным ГАБ с пьезокерамическим излучателем оптимальной по критерию массогабаритных и стоимостных характеристик ГАБ является дистанция обнаружения до 5-6 км.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1.Новиков А.В., Форостяный А.А. Реактивная система освещения подводной обстановки. Патент № 2012107303/11 от 28.02.2012.
- 2.Сташкевич А.П. Акустика моря. – Л.: Судостроение, 1966.
- 3.Урик Р.Д. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978.

*д.т.н. Л.Е. СОБИСЕВИЧ, д.ф.-м.н. А.Л. СОБИСЕВИЧ*

### ГРАВИТОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, НАВОДИМЫЕ ВИХРЕВЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ ВИНТОВЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Приведены теоретические предпосылки и отдельные результаты натурных наблюдений, позволяющие сформировать общее представление о гравитоманнитных полях вертолетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Война в Сирии показала, что различные беспилотные технические системы (БТС), в составе которых выделяются БПЛА, могут с успехом использоваться в боевых операциях и на суше, и в море. В этой связи появились и новые требования к развиваемому поколению мини-ракетных комплексов, которые смогут уничтожать вертолеты и БПЛА, в том числе из-под воды, на этапе их полета к объекту поражения.

#### ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Создание боевого поколения БТС относится к девяностым годам прошлого столетия. Авторы статьи начали проводить работы по поиску новых методов диагностики вихревых образований, сопутствующих движению, с момента, когда легкий винтомоторный самолет, управляемый Рустом, приземлился на Красной площади. Ведущие ученые СССР уже тогда понимали необходимость изучения электрических, акустических и магнитных ультранизкочастотных (УНЧ) и сверхнизкочастотных (СНЧ) полей летательных аппаратов различных конструктивных схем и других движущихся объектов, формирующих при полете геоакустические и электромагнитные поля.

БТС в последние годы находят всё более широкое применение в народном хозяйстве и в вооруженных силах. Основной тон в разработках новых беспилотных воздушных систем задают военные. Разработка БТС – одно из наиболее перспективных направлений развития современной военной авиации. БПЛА (дроны) уже привели к значительным изменениям в тактике ведения боевых действий. Ожидается, что уже в ближайшем будущем их значение возрастет еще больше. Прогресс беспилотных летательных аппаратов – это одно из важнейших достижений авиации за последние десятилетия.

БТС решают множество военных задач. Прежде всего это разведка – большинство дронов созданы именно для этой цели. Однако в последние годы появляется все больше ударных беспилотных аппаратов. В отдельную группу можно выделить дроны-камикадзе. БПЛА могут вести радиоэлектронную борьбу с противником, служить ретранслятором радиосигнала, давать целеуказания артиллерии. Используют дроны и в качестве воздушных мишеней.

Первые проекты летательных аппаратов без человека на борту были созданы сразу после появления самолетов, но реализовать эту идею на практике смогли только в конце 1970-х гг., и сразу же начался настоящий «беспилотный бум».

В наши дни разрабатываются БТС с большой продолжительностью полета, а также БПЛА, способные решать разнообразные задачи в самых тяжелых условиях. БТС как боевые единицы способны действовать большими группами (роями). Работы над БТС, в числе которых ведущее место принадлежит БПЛА, идут в десятках странах мира, над этой задачей трудятся тысячи частных компаний. Самые прогрессивные разработки попадают в руки военных. Некоторые БПЛА уже обладают высокой степенью автономности, и вероятно, что уже в ближайшем будущем дроны получат способность выбирать цель и при-

нимать решение о ее уничтожении автономно. В связи с этим возникает непростая этическая проблема: насколько гуманно доверять судьбу живых людей равнодушному и безжалостному боевому роботу.

Одновременно ведутся работы по созданию средств обнаружения и поражения дронов. В развитии этой проблемы естественно поставить вопрос и о создании морских мин и минно-ракетных комплексов, способных поражать воздушные цели.

Нам удалось провести натурные эксперименты, которые показали, что физические поля УНЧ и СНЧ диапазонов являются информативными с точки зрения обнаружения возмущений, наводимых низколетящими воздушными объектами, крупными вихревыми структурами, другими локальными неоднородностями, определяющими масштабные гравитационные движения в атмосфере и в других геосферах Земли (смерчи, торнадо, цунами и т.д.). Решение всего комплекса новых задач стало возможным, поскольку к этому периоду уже был получен богатый научный материал по атмосферному электричеству и создано соответствующее аппаратное обеспечение.

Исследования атмосферного электричества, имеющие более чем двухсотлетнюю историю, показали, что у земной поверхности существует стационарное электрическое поле, напряженность которого  $E$  составляет  $\sim 100$  в/м. Земля при этом имеет отрицательный заряд, а атмосфера в целом заряжена положительно. Однако наличие осадков в атмосфере, особенно при грозах, метелях, пылевых бурях и т.п., влияет на напряженность поля, которое может резко менять направление и величину, достигая иногда значений  $\sim 1000$  в/м. Наибольшие значения напряженности электрического поля в нижних слоях атмосферы отмечаются в средних широтах, а к полюсам и экватору она убывает. В зонах «хорошей» погоды напряженность электрического поля в атмосфере Земли с высотой в целом уменьшается, но в слое толщиной от 300 до 3000 м может с

высотой возрастать. Выше этого слоя напряженность электрического поля убывает с высотой по экспоненциальному закону и уже на высоте 10 км не превышает нескольких в/м.

Напряженность электрического поля в атмосфере меняется и во времени. Наряду с локальными суточными и годовыми вариациями напряженности электрического поля отмечаются синхронные для всех пунктов наблюдений суточные и годовые вариации – это так называемые унитарные вариации.

Электрическое состояние атмосферы и других геосфер Земли в значительной степени определяется их электрической проводимостью. В атмосфере электрическая проводимость создается ионами. Она зависит от количества ионов, содержащихся в единице объема (их концентрации), и их подвижности. Основной вклад в электрическую проводимость вносят легкие ионы, обладающие наибольшей подвижностью.

Электрическая проводимость атмосферы у земной поверхности очень мала, увеличиваясь с высотой примерно по экспоненциальному закону. На высоте около 30 км электрическая проводимость достигает значений почти в 150 раз больших, чем у земной поверхности. Выше проводимость увеличивается еще более, причем особенно резко на высотах, до которых проникает ионизирующее излучение Солнца и где начинается образование ионосферы, проводимость которой приблизительно в 1000 раз больше, чем проводимость у земной поверхности.

Движение ионов под действием сил электрического поля создает в атмосфере вертикальный ток. При движении в атмосфере материальных тел или перемещения турбулентных вихревых структур удается наблюдать аномальные электрические и магнитные возмущения, проявляющиеся на фоне естественного магнитного поля Земли. Во всех случаях они связаны с движением больших объемов воздушных масс, зачастую сильно наэлектризованных.

### ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ, НАВОДИМЫЕ ВИНТОВЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Изучение возмущений в магнитном поле Земли, возникающих при активном управляемом силовом воздействии на окружающую среду движущимися летательными аппаратами (ЛА), в том числе и с учетом границ раздела типа «воздух – поверхность воды» или «воздух – поверхность земли», проводились авторами с использованием вертолетов различных конструктивных схем [1, 2]. Оказалось, что вертолеты являются хорошими летающими лабораториями, которые можно использовать при изучении геофизических полей современных дронов. Действительно, несущие винты современных вертолетов генерируют мощные вихревые структуры, которые возмущают окружающую среду, а на малых высотах полета активно воздействуют на границы раздела. При этом имеет место генерация заметных акустических, геоакустических и магнитных (гравитомангнитных) полей.

Проведенные натурные исследования подтвердили, что вертолет – это очень удобный физический объект, позволяющий проводить управляемые эксперименты, направленные на изучение локальных вихревых структур и акустических, магнитных и сопутствующих геофизических полей.

Действительно, при быстром движении или вращении лобого (например, несущего) винта вертолета в реальной атмосфере возникают мощные вихревые потоки, которые вызывают генерацию геофизических полей вращающимися лопастями и наэлектризованными вихревыми потоками в результате:

– наличия трибоэлектрического эффекта;

– контактной разности потенциалов между поверхностью винта и частицами облаков и осадков;

– ряда иных известных физических процессов в турбулентных потоках.

Многие из затронутых процессов изучались для поступательно движущихся самолетов и снарядов [3, 4]. Так, например, известно, что самолеты в полете могут приобретать заряд порядка  $10^{-3}$  Кл, заряжаясь до напряжений  $10^5$  В [3]. Причина – быстро вращающиеся воздушные винты, которые при взаимодействии лопастей с окружающей средой создают хорошие условия для генерации не только акустических, но и электромагнитных полей.

Наблюдались случаи поражения людей электрическим током, стекавшим с зависшего поисково-спасательного вертолета. Вращение наэлектризованных лопастей вертолетов часто сопровождается излучением коронирующих разрядов (рисунок 1). Кроме того, движение лопастей генерирует и характерные УНЧ магнитные возмущения [1, 2].

В спектре магнитных полей вращающихся винтов или сопутствующих вихрей, всегда удается выделить дискретные составляющие (гармоники), обусловленные частотами лопастей или мощных вихревых образований, формирующими спектральный «портрет» любого летательного аппарата. Это явление отмечается в любых типах БЛА, каждый из которых имеет в этой связи свой портрет. Такой портрет позволяет судить о типе летательного аппарата, о конструктивных особенностях и дефектной структуре винта, решать задачи классификации и диагностики современных вертолетов и других ЛА, включая БПЛА.



Рисунок 1 – Коронирующие разряды на лопастях вертолетных винтов

Проведенные авторами исследования физических процессов, которые объясняют появление источников магнитных возмущений на лопастях вращающегося вертолетного винта с выделением как регулярной, так и шумовой компоненты, обусловленной вихревыми потоками, проливают свет на сложную структуру физических полей, генерируемых БПЛА.

Развиваемые ниже теоретические построения являются той фундаментальной основой, которая позволяет проанализировать экспериментальные результаты и начать изучение всего класса фундаментальных проблем акустических, электромагнитных и тепловых полей современных беспилотных летательных аппаратов, которые начали активно использоваться как в народном хозяйстве, так и в военных целях.

### ГРАВИТОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, НАВОДИМЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

У многих БЛА основным движителем являются винты. Пусть винт имеет  $N$  лопастей, каждой из которых присвоен свой номер  $k$ . Известно, что эти лопасти несколько отличаются одна от другой по своим диэлектрическим свойствам. Кроме того, заряд  $q_k$  по-разному накапливается на  $k$ -й лопасти и стекает с нее из-за нестационарности процессов обтекания (срыва вихрей, турбулизации потока) и различий в свойствах перетекаемых воздушных масс.

В общем случае  $q_k = q_k(t)$ , причем эта зависимость имеет как регулярную, так и шумовую компоненты.

Пример для поверхностной плотности заряда на лопасти

$$\rho_k = \frac{2}{l^2} q_k(t) f_k \left( \frac{r}{l} \right) \Phi \left( \varphi - \frac{2\pi}{N} k - \Omega t \right) \quad (1)$$

Здесь и далее использована цилиндрическая система координат, ось  $Z$  которой совпадает с осью винта. Безразмерные функции  $f_k$  и  $\Phi$  описывают распределение заряда по радиальной координате  $rr$  (т.е. вдоль лопасти длиной  $l$ ) и по углу  $\varphi$ ;  $\Omega$  – угловая скорость вращения.

Для расчета квазистационарного магнитного поля воспользуемся уравнением вида

$$\Delta H = -\frac{4\pi}{c} \sum_{k=1}^N \text{rot}(\rho_k [\Omega r]) \quad (2)$$

Решение (2) удобно записать через ньютоновский потенциал. Тогда для осевой компоненты поля получим:

$$H_z = -\frac{2\Omega}{c l^2} \sum_{k=1}^N q_k(t) \int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial r_1} \left( r_1^2 f_k \left( \frac{r_1}{l} \right) \right) dr_1 \times \int_0^{2\pi} \frac{\Phi \left( \varphi_1 - \frac{2\pi}{N} k - \Omega t \right) d\varphi_1}{(r^2 + z^2 + r_1^2 - 2r r_1 \cos(\varphi - \varphi_1))^{\sqrt[3]{2}}} \quad (3)$$

Внутренний интеграл в (3) запишем так:

$$\frac{1}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \sum_{n=0}^{\infty} I_n \left( \frac{r_1}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \right)^n, \quad (4)$$

где

$$I_n = \int_0^{2\pi} P_n \left[ \frac{r}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \cos(\varphi - \varphi_1) \right] \times \Phi \left( \varphi_1 - \frac{2\pi}{N} k - \Omega t \right) d\varphi_1$$

Здесь  $P_n$  – полином Лежандра порядка  $n$ .

Воспользуемся теперь тем очевидным фактом, что каждая из лопастей с номером  $k$  описывается функцией  $\Phi(\varphi)$ , периодической по углу  $\varphi$  с периодом  $2\pi$ . Поэтому она представима в виде разложения в ряд Фурье

$$\Phi(\varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} b_m \cos(m\varphi), \quad (5)$$

где  $b_m$  – коэффициенты разложения, определяемые геометрией винта.

Подставляя (3.5) в (3.4), вычислим первые три интеграла:

$$I_1 = \pi b_1 \frac{r}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \cos(\Psi),$$

$$\Psi = \varphi - \frac{2\pi}{N} k - \Omega t,$$

$$I_2 = \frac{\pi}{2} b_0 \frac{r^2 - 2z^2}{r^2 + z^2} + \frac{3\pi}{4} b_2 \frac{r^2}{r^2 + z^2} \cos(2\Psi),$$

$$I_3 = \frac{5\pi}{8} b_3 \frac{r^3}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \cos(3\Psi) + \pi b_1 \left[ \frac{15}{8} \frac{r^3}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} - \frac{3}{2} \frac{r}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \right] \cos(\Psi) \quad (6)$$

Анализируя полученные соотношения, следует отметить, что член  $I_1$  описывает гармонику с частотой  $\Omega$  вращения винта. Член  $I_2$  описывает постоянную составляющую, а также вторую гармонику  $2\Omega$ . Член  $I_3$ , содержит спектральные компоненты  $3\Omega$  и  $\Omega$ . Очевидно, что гармоника  $n\Omega$  впервые появится в члене  $I_n$ ; она будет

содержаться также в некоторых слагаемых с большими номерами  $m > n$ .

Из экспериментальных измерений величины заряда на вращающемся винте известно, что она пропорциональна кубу скорости.

Поскольку  $v^3 = (\Omega r)^3 \sim r^3$ , положим в формуле (3.1)

$$f_k(r/l) = \alpha_k (r/l)^3,$$

где  $\alpha_k$  – коэффициенты пропорциональности.

Ограничиваясь наблюдением на расстояниях  $(r^2 + z^2)^{1/2} \gg 1$ , превышающих длину лопасти, для первых трех гармоник имеем

$$H_z^{(1)} = \frac{5\pi}{3} b_1 \frac{\Omega}{c} \frac{l r}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \sum_{k=1}^N \alpha_k q_k(t) \cos\Psi,$$

$$H_z^{(2)} = \frac{15\pi}{14} b_2 \frac{\Omega}{c} \frac{l^2 r^2}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \sum_{k=1}^N \alpha_k q_k(t) \cos(2\Psi), \quad (7)$$

$$H_z^{(3)} = \frac{25\pi}{32} b_3 \frac{\Omega}{c} \frac{l^3 r^3}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}} \sum_{k=1}^N \alpha_k q_k(t) \cos(3\Psi).$$

Из формул (7) следует, что амплитуды гармоник изменяются с расстоянием по различным законам, причем

$$H_z^{(1)} : H_z^{(2)} : H_z^{(3)} = 1 : \frac{l r}{r^2 + z^2} : \frac{l^2 r^2}{(r^2 + z^2)^{\sqrt[3]{2}}}$$

Таким образом, чем выше номер гармоники, тем меньше ее амплитуда.

С другой стороны, в случае абсолютно одинаковых лопастей следует положить  $\alpha_k = \alpha$ ,  $q_k = q$ . При этом  $\alpha$  и  $q$  в формулах (7) будут вынесены из-под знака суммы, и нужно будет просуммировать выражения

$$S_m = \sum_{k=1}^N \cos m \left( \varphi - \Omega t - \frac{2\pi}{N} k \right),$$

$m = 1, 2, \dots, N$ .

Нетрудно понять, что в спектре винта с числом лопастей  $N$

$$S_1 = S_2 = \dots = S_{N-1} = 0,$$

$$S_N = N \cos N(\varphi - \Omega t).$$

Таким образом, остается только гармоника  $N\Omega$  (вообще говоря, и ее кратные гармоники  $Nn\Omega$ ), а все низшие гармонические составляющие исчезают. Это явление связано с инвариантностью идеализированной системы относительно поворота на угол  $2\pi/N$ . В случае реального винта действуют две противоположные тенденции. С одной стороны, чем выше номер гармоники, тем она слабее из-за фактора  $l r / (r^2 + z^2) \ll 1$ . С другой стороны, всегда выделя-

ется гармоника с номером  $n = N$ , равным числу лопастей.

Для численной оценки спектральных составляющих необходимо знать: разброс параметров лопастей, т.е. коэффициенты  $\alpha_k$  и свойства функций  $q^k(t)$ ; конфигурацию винта и распределение зарядов по поверхности; условия проведения измерений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ГРАВИТОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВЕРТОЛЕТОВ

Экспериментальные исследования гравитомагнитных полей вращающихся винтов для вертолетов двух конструктивных схем были впервые проведены авторами статьи в натуральных аэродромных и морских условиях (район Севастополя). Выбор места проведения экспериментов был обусловлен наличием в этом районе Черного моря развитой секционной антенной системы, которая была уложена на дне моря с целью защиты военно-морской базы ЧФ СССР от несанкционированного проникновения подводных объектов в бухты Севастопольской базы флота. Именно здесь были получены уникальные экспериментальные результаты, позволившие впервые составить первое представление о частотных спектрах и структуре акустических и магнитных и гравитомагнитных полей вертолетов различных конструктивных схем.



Отметим, что изучение магнитных и гравитомангнитных полей, генерируемых вращающимся вертолетным винтом, при помощи измерительной донной антенной системы, уложенной на глубине более 60 м в море, позволило отстраниться от электрических помех и получить четкие записи как вертолетных магнитных полей, так и шумановских резонансов.

Первые опыты в аэродромных условиях были проведены с использованием вертолетов конструкторского бюро Миля. Вертолет зависал на заданной высоте, а индукционные магнитометры системы Павла Беляева располагались на грунте. В процессе экспериментов изучались гравитомангнитные поля, наведенные несущим пятилопастным и хвостовым винтами. В процессе проведения экспериментальных работ в условиях аэродрома были получены пред-

ставленные спектры магнитных полей вертолетов Ми-14, которые в процессе проведения эксперимента зависали на высоте 80 м над измерительной системой с некоторым сдвигом относительно места установки индукционного измерителя.

На рисунке 2 показана частотная зависимость напряженности гравитомангнитного поля для несущего и хвостового винтов вертолета Ми-14. Частота вращения вала (отмечена цифрой 1) составляет 3.2 Гц. В спектре четко выражена дискретная составляющая, связанная именно с этой частотой. Другие составляющие соответствуют лопастным гармоникам. Здесь четко зафиксирована и дискретная составляющая (6), соответствующая частоте вращения рулевого винта (18.5 Гц). В спектре присутствуют также частота вращения вала (1) и лопастные гармоники.

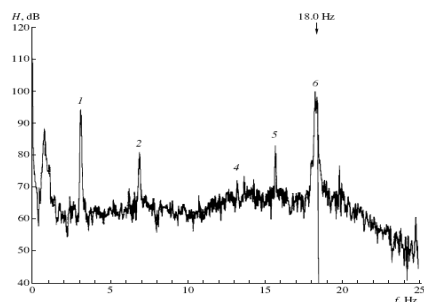


Рисунок 2 – Спектр магнитного поля, создаваемого вертолетом Ми-14:  
1 – дискретная составляющая, соответствующая частоте вращения вала,  
2, 4, 5 – лопастные гармоники, 6 – дискретная составляющая,  
соответствующая частоте вращения вала хвостового винта

На рисунке 3 представлены данные другого эксперимента. Здесь цифрами 2, 3, 4 обозначены соответственно вторая, третья и четвертая гармоники с частотами 6.4, 9.6, 12.8 Гц. Наблюдаемое раздвоение спектральной линии 2 связано с

конструктивными особенностями лопастей конкретного несущего винта вертолета Ми-14, который был выделен для обеспечения научных работ. У других вертолетов отмеченный эффект отсутствовал.

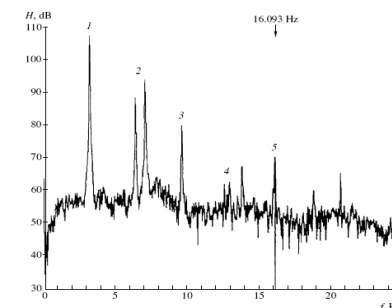


Рисунок 3 – Спектр гравитомангнитного поля, создаваемого вертолетом Ми-14:  
1 – дискретная составляющая, соответствующая частоте вращения вала,  
2, 3, 4 – лопастные гармоники, 5 – дискретная составляющая,  
соответствующая частоте вращения вала хвостового винта

Интересные научные результаты были получены и при изучении магнитных полей вертолетов соосной схемы – вертолет типа Ка-25. Этот тип вертолетов имеет два несущих винта, которые вращаются в разные стороны. Эти эксперименты проводились в морских условиях, когда вертолет Ка-25 зависал над измерительной петлевой антенной системой, уложенной на дне моря.

В процессе этих экспериментальных исследований удалось установить, что генерируемые отдельными лопастями магнитные поля компенсируют друг друга. В результате остается только одна гармоника,

соответствующая частоте вращения вала (рисунок 4.).

Отметим, что в этих экспериментах нам удалось выйти и на измерение уровней сигнала, связанного с шумановскими резонансами. На рисунке 4 цифрой 2 обозначены первый и второй резонансы. Здесь же отчетливо наблюдается и выход на третий резонанс. Такой четкий результат объясняется тем, что при проведении измерений антенными комплексами, расположенными на дне моря, удалось исключить помехи, которые обусловлены наличием электрических помех в атмосфере.

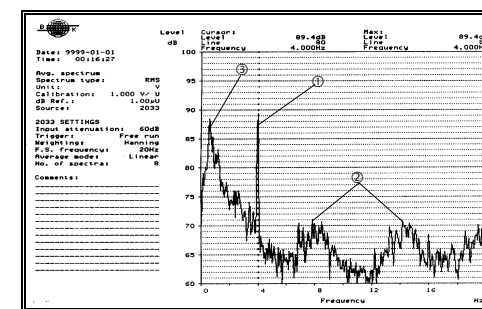


Рисунок 4 – Спектр уровня сигнала воздушного источника (вертолет типа Ка-25):  
① – дискретная составляющая, соответствующая частоте вращения вала,  
② – шумановские резонансы, ③ – шумы моря

Экспериментально установлено, что квазистатические магнитные и гравитомангнитные поля воздушных винтов современных вертолетов на 30–40 дБ превышают естественный шумовой фон и могут быть уверенно зарегистрированы во многих реальных ситуациях, включая подводные условия, когда вертолет работает вблизи водной поверхности. Этот результат имеет принципиальное значение для практических приложений и дальнейшего развития теоретических построений. При характеристике магнитных полей, генерируемых винтомоторной группой, пока не учитывались наличия низкочастотных сейсмогравитационных возмущений, которые возникают на границе раздела «воздух –

земля» или «воздух – вода». При зависании вертолета на малой высоте мощные вихревые потоки, генерируемые несущими винтами, приводят в движение большие объемы воздуха, которые всей своей тяжестью обрушиваются на границу раздела, генерируя сейсмические и гидроакустические процессы в нижнем полупространстве.

Авторы надеются, что развиваемое научное направление позволит в дальнейшем выйти на создание автономных систем поражения современных дронов, включая подводные минные системы и специальные образцы вооружения ПЛ для поражения приближающихся летательных аппаратов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко О.В., Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Электромагнитное поле вращающегося воздушного винта // Доклады Академии наук. – Т. 351. – 1996. – № 2. – С. 260-263.
2. Собисевич Л.Е. Акустические, гидроакустические и магнитные поля ЛА. – М.: СПП РАН, 1979. – 198 с.
3. Имянитов И.М. Электризация самолетов в облаках и осадках. – Л.: Гидрометеониздат, 1970. – 210 с.
4. Trinks H., Ter Haseborg J.L. // IEEE Trans. Aerospace and Electron. Syst. 1982. V. AES-18. J № 3.
5. Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики и вулканологии. – М.: ИФЗ РАН, 2010. – 464 с.

УДК 681.883:532.517.4

к.т.н. В.Р. ГЕССЕН

### О ВЛИЯНИИ ИЗГИБНО-КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРЫ ВБЛИЗИ ПРИЕМНИКА ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЕГО РАБОТУ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Рассмотрено воздействие псевдозвука турбулентности пограничного слоя на неоднородность его границы. Представлено решение, показывающее трансформацию псевдозвука в акустическое излучение на неоднородностях различных типов, в том числе содержащих звукопрозрачные и полубесконечную пластину с импедансом изгибных колебаний. Приведены результаты расчетов такого излучения при воздействии однородного поля турбулентности.

#### ВВЕДЕНИЕ

Турбулентность как одна из форм существующих возмущений жидкостей и газов является предметом фундаментальных и поисковых исследований многих авторов, связанных с вопросами распространения и излучения физических полей разного рода в этих средах. Для гидроакустики с ее практическими приложениями наиболее значимыми являются аспекты излучающей способности турбулентных движений сжимаемой жидкости, в том числе в турбулентном пограничном слое (ТПС) вблизи границ [1]. Однако при изучении ТПС в исследованиях наблюдается преобладание информации о псевдозвуковых пульсациях ТПС над информацией о его акустическом излучении [2]. Причиной этого является практикуемая методика наблюдения излучения собственно ТПС на фоне излучения, вызванного вынужденными колебаниями формирующих ТПС структур [3,4]. В качестве мешающих наблюдению факторов также называют фоновые излучения, вызываемые трансформацией неоднородных волн псевдозвука на акустических неоднородностях границ ТПС, например вносимых измеритель-

ными приемниками турбулентных пульсаций давления или некоторыми видами пространственных фильтров в виде сочетания жестких и прозрачных для звука участков границ ТПС [5, 6]. Рассмотрение эффекта такой трансформации является предметом предлагаемой статьи.

#### ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Турбулентный пограничный слой как источник пульсаций давления полагаем допустимым заменить слоем диполей, считая их преобладающими над другими источниками (квадруполи, монополи). Тогда задача формулируется следующим образом.

Слой диполей, нормальных плоскости  $z = const$ , расположен в плоскости  $z = 0$ . Параллельно ему при  $z = -h$  расположена отражающая поверхность (рисунк 1). Диполи случайным образом распределены в пространстве и изменяются во времени случайным же образом.

Необходимо определить излучение звуковой энергии указанным слоем при условии неоднородности ограничивающей ТПС поверхности типа линейного стыка разнородных сред при  $z = -h$ .

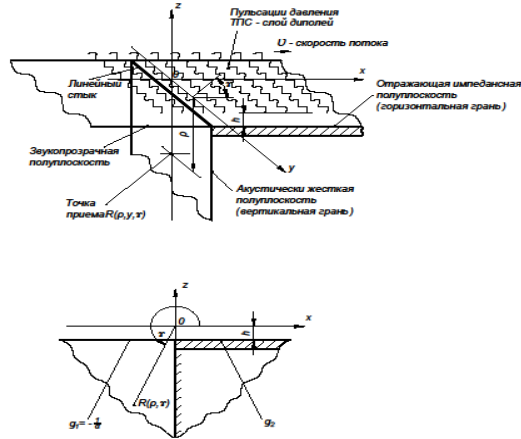


Рисунок 1 – Физическое представление задачи

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФРАКЦИИ**

Полагаем, что структура исходного поля источников на уровне моментов второго порядка может быть полностью задана энергетическим частотно-волновым спектром давлений (или потенциала) на жесткой стенке при  $z = 0$ .

$$\Delta \varphi_{\pi}(x, y, t) = \exp[i(K_x x + K_y y - \omega t)], \tag{1}$$

$$\varphi_0(x, y, z) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \exp[i(K_x x + K_y y) - \alpha z] & \text{при } z \geq 0 \\ \frac{1}{2} \exp[i(K_x x + K_y y) + \alpha z] & \text{при } z \leq 0 \end{cases} \tag{2}$$

Здесь  $\alpha = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}$ ;  $k = \omega/c$  – волновое число звуковых волн в среде.

Волновое поле вида (2) при  $k_x^2 + k_y^2 > k^2$  рассматриваем как псевдозвуковую волну диполей, понимая под псевдозвуком такие движения среды, которые не сопровождаются переносом звуковой энергии по нормали к слою источников.

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \varphi_0 + \varphi_S^I && \text{при } x < 0, \\ \Phi_2 &= \varphi_0 + \varphi_{0mp} + \varphi_S^0 && \text{при } x > 0, \end{aligned} \tag{3}$$

Это позволяет рассматривать искомую трансформацию исходя из задания при  $z = 0$  граничного условия (1) для источников в виде плоских волн со случайными амплитудами, волновое поле которых в пространстве имеет вид (2):

В случае неоднородной поверхности, состоящей из двух полуплоскостей – звукопрозрачной при  $x < 0$  и импедансной при  $x > 0$ , характеризуемой показателем  $g$ , определение излучаемого поля проводим исходя из системы потенциалов следующего вида:

где  $\varphi_S^I$  и  $\varphi_S^0$  – потенциалы рассеянных волн, обусловленных неоднородностью поверхности,  $\varphi_{0mp}$  – потенциал отраженной от импедансной полуплоскости волны.

Для упрощения в (3) введено допущение: плоскость  $x = 0$  при  $z < -h$  является абсолютно жесткой границей, а искомое излучение (рассеяние) может иметь место лишь в области звукопрозрачной полуплоскости т. е.  $\varphi_S^0 = 0$

На основе интегральных преобразований Фурье было получено [7] решение, которое свидетельствует о трансформации псевдозвуковых пульсаций давления турбулентного пограничного слоя (ТПС) в звуковое излучение на неоднородности импеданса рассматриваемого типа. Для области пространства  $z < 0$  ( $p \sin \gamma < 0$ ) решение имеет вид:

$$\varphi_S^I(x, y, z) = \frac{K_x}{2\sqrt{2\pi}} e^{-\kappa h} e^{iK_y y} \left( \frac{1+g\kappa}{1-g\kappa} \frac{1}{\kappa \sin \gamma + \alpha} - \frac{1}{\kappa \sin \gamma - \alpha} \right) \frac{e^{i\kappa z} (1 + \frac{h}{p} \sin \gamma)^2 - i\pi/4}{\sqrt{K_p \left[ \frac{K_x^2}{K^2} (1 + \frac{h}{p} \sin \gamma)^2 \right]}} \tag{4}$$

**ИЗЛУЧЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОСТИ. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ**

Количественная оценка величины давления этого звукового поля источников для пространственной области  $p \sin \gamma < 0$ , выполнена согласно следующему выражению [8]:

$$\overline{p^2}(R, \omega) = K^2 \iint_{-\infty}^{\infty} |\varphi_S^I(\overline{K}_x, \overline{K}_y, \omega, R)|^2 E_{\varphi}(\overline{K}_x, \overline{K}_y, \omega) d\overline{K}_x d\overline{K}_y, \tag{5}$$

где  $R$  – радиус-вектор в цилиндрической системе координат  $p, \gamma, \gamma$ ;  $\overline{K}_{xy} = \frac{K_{xy}}{\kappa}$ ;  $\sqrt{k^2 - K_y^2} = \kappa$ ;  $\kappa$  – волновое число звука в воде;  $E_{\varphi}(\overline{K}_x, \overline{K}_y, \omega)$  – частотно-волновой спектр турбулентных пульсаций давления для модели Коркоса [9]:

$$E_{\varphi}(\overline{K}_x, \overline{K}_y, \omega) = \frac{P(\omega)}{\pi^2 K^2} \frac{abM_g^2}{[a^2 + (1 - M_c \overline{K}_x)^2](b^2 + M_g^2 \overline{K}_y^2)}, \tag{6}$$

где  $P(\omega)$  – спектр мощности турбулентных пульсаций давления;  $a = 0,55/2\pi$ ;  $b = 3,5/2\pi$ ;  $M_c = 0,7v/c$ ;  $v$  – скорость потока жидкости;  $c$  – скорость звука в жидкости.

Расчет был выполнен для следующих вариантов импеданса горизонтальной грани: акустически жесткая граница ( $kg = 100$ ), акустически мягкая граница ( $kg = 10^{-8}$ ), импеданс пластины с односторонним нагружением пластины жидкостью ( $kg = -iz/\rho c$ ), где  $z$  – импеданс «толстой» изгибно-колеблющейся гомогенных алюминиевой и латунной пластин с параметрами, представленными в таблице 1, согласно [10] равный:

$$z = \frac{B(1+i\eta)(k_x^2 + k_y^2)^2 - \omega^2 m''(k_x^2 + k_y^2) \left( \frac{B}{Gh} + \frac{h^2}{12} \right) - \omega^2 m''(1 - \omega^2 m'' \frac{h}{12G})}{i\omega(1 - \omega^2 m'' \frac{h}{12G} + (k_x^2 + k_y^2) \frac{B}{Gh})} \tag{7}$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $G = \frac{E}{2(1+\sigma)}$ ;  $m''$  – поверхностная масса;  $m'' = \rho_M h_{nl}$ ;  $\rho_M$  – плотность материала пластины;  $h_{nl}$  – толщина пластины;  $B$  – изгибная жесткость:  $B = \frac{Eh_{nl}^3}{12(1-\sigma^2)}$ .

Интегрирование в (5) должно ограничиваться соотношением  $\kappa_x^2 + \kappa_y^2 > \kappa^2$ , что соответствует области псевдозвуковых компонент частотно-волнового спектра ТПС в рассмотренной задаче.

Таблица 1 – Принятые в расчетах характеристики материалов

Материал	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость продольной волны, м/с
Алюминий	$72 \cdot 10^9$	0,34	2700	5200
Латунь	$95 \cdot 10^9$	0,33	8500	3200

Расчеты излучаемого акустического поля, порождаемого трансформацией псевдозвуковых возмущений ТПС на неоднородности границы, приводились для точки наблюдения с координатами  $p = 1$  м,  $y = 0$ ,  $\gamma = 270$  град. Результаты расчетов в виде спектров, нормированных спектром мощности турбулентных пульсаций давления  $P(\omega)$ , приведены на рисунке 2 в дБ с условиями импе-

данса грани под ТПС: мягкость, жесткость, пластины латунной и алюминиевой с толщинами НРЛ 5, 10, 20 мм, с возвышением ТПС над гранью  $h = 0,1$  мм, а на рисунке 3 в дБ представлены результаты расчетов эффектов подавления этого вида излучения отдалением ТПС от его границы путем возвышения над гранью с помощью акустически водоподобного материала.

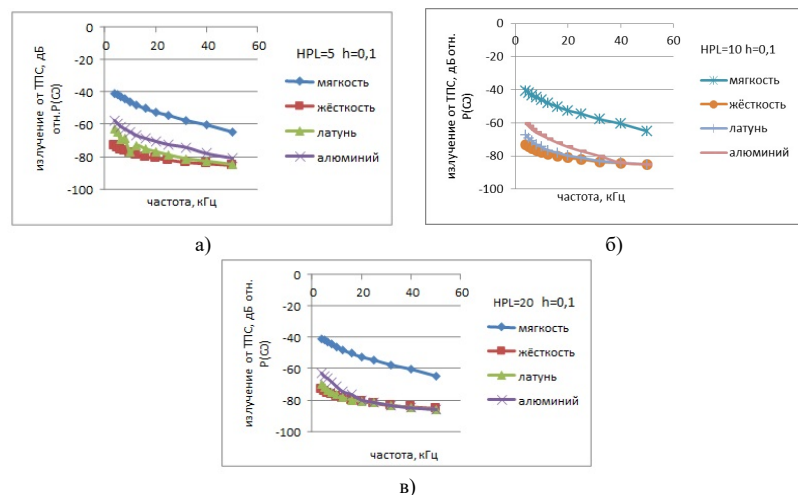


Рисунок 2 – Спектры излучения, вызываемого псевдозвуком турбулентного пограничного слоя в условиях неоднородности его границы, содержащей полуплоскость акустически мягкую, жесткую или с изгибно-колеблющимися пластинами из латуни и алюминия с толщиной: а) – 5 мм; б) – 10 мм; в) – 20 мм

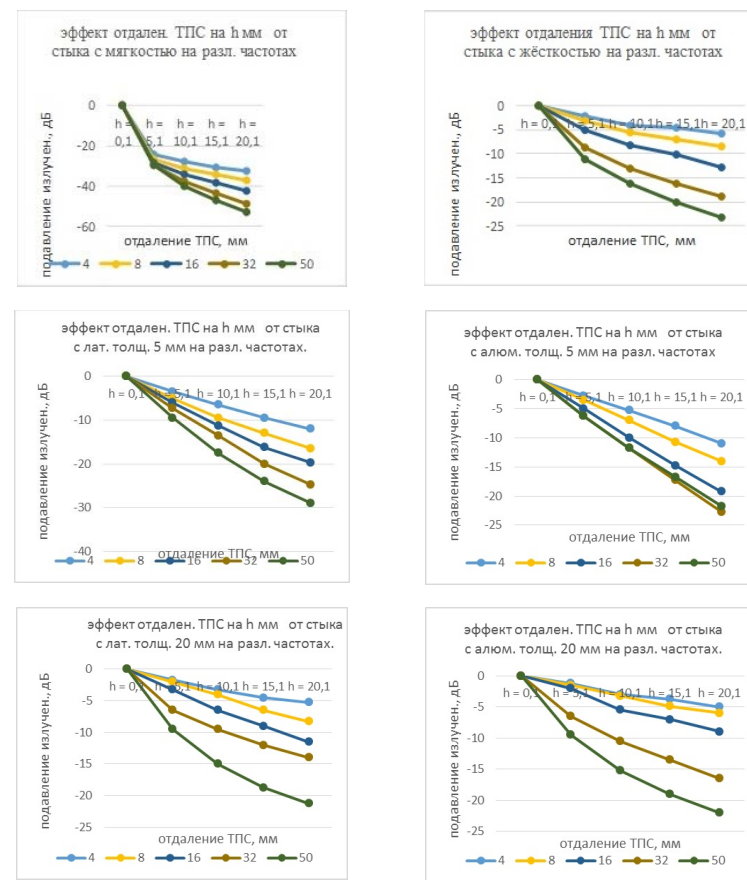


Рисунок 3 – Эффекты влияния отдаления ТПС от стыка в структуре его границы

### ВЫВОДЫ

Из результатов расчета следует, что рассматриваемый тип излучения характеризуется монотонно спадающими с повышением частоты спектрами, зависящими по величине и степени спадания от типа входящей в неоднородную поверхность границы, а также от удаления  $h$  погранич-

ного слоя от этой поверхности. Влияние скорости потока жидкости  $M_c$  на мощность этого излучения характеризуется степенной зависимостью вида  $\sim M_c^2$ , что согласуется с оценками мощности излучения собственно ТПС [11, 12].

Таким образом, результаты проведенного расчетно-теоретического иссле-

дования свидетельствуют, что при работе приемника звукового давления в турбулентном пограничном слое он подвержен влиянию излучения, создаваемого трансформацией псевдозвука ТПС границей, содержащей звукопрозрачную структуру приемника и кромку обрамляющей его изгибно-колеблющейся структуры. Ми-

нимальное влияние трансформации наблюдается в условиях идеально жесткой обрамляющей структуры, которая может быть достигнута применением толстых пластин металла с высокой удельной плотностью либо отдалением ТПС от граничащей с ним структуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смольяков А.В. Турбулентный пограничный слой на поверхности геофизической антенны. // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56.
2. Смольяков А.В., Ткаченко В.М. Модели поля турбулентных пристеночных давлений и опытные данные. // Акустический журнал. – 1991. – Т. 37.
3. Ткаченко В.М., Смольяков А.В., Колышницын В.А., Маршов В.П. Турбулентные пульсации давления в пограничном слое протяженного цилиндра при его продольном обтекании. // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56.
4. Ткаченко В.М., Смольяков А.В., Колышницын В.А., Маршов В.П. Частотно-волновой спектр турбулентных давлений: способы измерения и результаты. // Акустический журнал. – 2008. – Т. 54.
5. Антонова А.Г., Горелов А.А., Колышницын В.А., Маршов В.П. Определение эффективности снижения вибрации и шумозлучения мягко-твердых конструкций всплывающего устройства, возбуждаемых турбулентными пульсациями давления. // Труды XIV конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб., 2014.
6. Турбулентные шумы обтекания: Библиографический указатель литературы, 1975-1977 гг. / Сост. Лунина И.И.; Под ред. Красильниковой Т.Н. – Л.: ЦНТБ, 1981.
7. Ланге Ф. Корреляционная электроника. – Л.: Изд. судостр. промышленности, 1963.
8. Corcos G.M. Resolution of pressure in turbulence, JASA, 1963, v. 35, p 192.
9. Гессен В.Р. Разработка математической модели и средств уменьшения турбулентного шума... – Дисс. ... к.т.н., 1985.
10. Acustica, 1969, v.21, № 3.
11. Долгова И.И. К вопросу об излучении звука пограничным слоем // Акустический журнал. – 1969, вып. 1, т. XV. – С. 220-227.
12. Миниович И.Я., Перник А.Д., Петровский В.С. Гидродинамические источники звука. – Л.: Судостроение, 1972.

УДК 626.9

*П.Д. СУХОПАРОВ*

### МОНОГРАФИЯ АКАДЕМИКА В.В. АДУШКИНА «ПОДВОДНЫЕ И ПРИБРЕЖНЫЕ ВЗРЫВЫ»

В статье кратко проанализировано содержание уникальной монографии, изданной Концерном к 75-летию образования НИИ-400, и приведены выдержки из отзывов о ней ведущих специалистов ВМФ и ОПК, которые дают ей высокую оценку.

В 2018 году руководство Концерна по рекомендации профессора Л.Е. Собисевича приняло решение о целесообразности обобщения научно-технической информации по подводным и прибрежным взрывам в виде монографии. Выполнить эту работу согласился академик РАН Виталий Васильевич Адушкин, являющийся выдающимся ученым в области геофизики, геомеханики и физики взрыва, внесшим значительный вклад в исследования взрывных процессов [1]. В течение продолжительного времени

В.В. Адушкин занимался научным обеспечением эффективности и безопасности проведения ядерных испытаний в СССР, исследованиями действия подземных и подводных ядерных взрывов, а также крупных взрывов химического взрывчатого вещества.

В 2019 году была издана посвященная 75-летию образования НИИ-400 (ныне АО «Концерн «МПО – Гидроприбор») монография В.В. Адушкина и Б.Д. Христофорова «Подводные и прибрежные взрывы» [2].

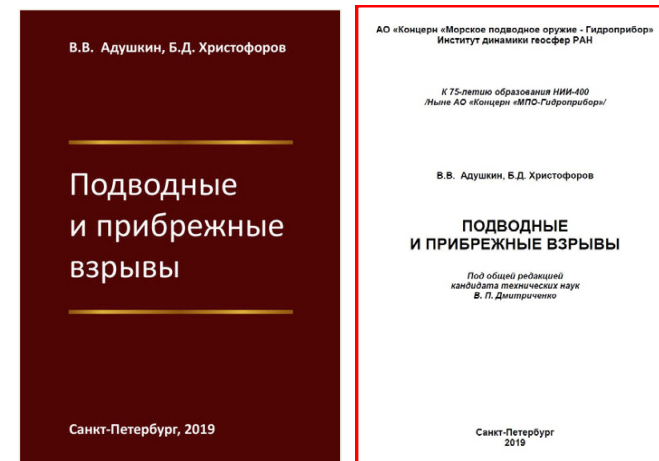


Рисунок 1 – Обложка и титульный лист монографии



В книге представлены основные сведения о результатах теоретических и экспериментальных исследований эффектов развития и действия подводных взрывов при выполнении крупномасштабных экспериментов с зарядами химических взрывчатых веществ в различных акваториях, а также при испытаниях морского ядерного оружия на Новоземельском полигоне и аналогичных испытаниях США на полигонах в Тихом океане в период с 1946 по 1962 гг., которые до сих пор являются актуальными и вряд ли будут когда-либо повторены в таких масштабах. Результаты этих испытаний дают полное представление о комплексе явлений, возникающих при подводных ядерных взрывах, и их поражающих факторах. Уникальными являются приведенные авторами результаты натурных испытаний ядерных взрывов с участием кораблей разного класса, подводных лодок, а также ряда объектов Военно-морского флота и прибрежных баз. Полученные результаты оказались востребованы при уточнении зон поражения целей торпедой с ядерным боезарядом, разработке мер по противоядерной защите кораблей и подводных лодок нового поколения.

В монографии также представлены результаты подводных взрывов химических взрывчатых веществ (ВВ) различного масштаба в Ладожском озере, Мертвом и Черном морях. В результате анализа результатов подобных испытаний представлены основные закономерности распространения подводной ударной волны и других факторов взрывов, а также их воздействия на морские объекты. Представлены результаты измерений параметров волновых полей, возникающих при подводных взрывах в воде и атмосфере, и сейсмических колебаний на побережье. Отдельная глава посвящена современным подходам к решению задач о воздействии подводных взрывов на различные преграды больших и малых размеров. В

приложении описаны результаты испытаний по воздействию подводной ударной волны на подводных пловцов.

В последнее время результаты исследований подводных взрывов вновь стали актуальными в связи с начавшимся перевооружением флота и разработкой новых видов морского оружия, а также расширением гидроакустических и океанологических исследований на шельфах в морях и крупных акваториях. Такие вопросы, как подводная сейсморазведка, анализ искусственных и естественных цунами, влияние ударных волн на живые организмы и сооружения делают актуальными проведение дальнейших исследований взрывных процессов.

Книга содержит введение, семь глав, включающих специализированные разделы, приложение и список литературы.

В главе 1 рассмотрены уравнения состояния воды и продуктов взрыва, ВВ в однородной безграничной жидкости. Здесь же приведены результаты исследований параметров ударных волн и газового пузыря при взрывах по данным экспериментов и расчетов, а также экспериментальные данные по взрывам сферических зарядов литого тротила и пентолита массой до 137 кг, прессованных граммовых зарядов разной плотности из тэна и азида свинца, взрывов зарядов тэна в центре сферических полостей с воздухом и взрывов детонирующего шнура. Представлены основные параметры детонации и продуктов взрыва различных ВВ и результаты исследований влияния свойств источника с разной объемной концентрацией энергии на действие взрывов в воде и воздухе. Рассмотрены вопросы энергетического подобия при взрывах в воде и воздухе. В заключительном разделе главы приведены результаты численного расчета подводного ядерного взрыва и дано определение тротилового эквивалента.

Глава 2 посвящена действию взрывов в ограниченном водоеме и исследованию влияния свободной поверхности и дна водоёма на параметры подводных химических и

ядерных взрывов в глубоких и мелких водоёмах. Рассмотрено действие взрывов разных ВВ в мелких водоёмах, включая глубину, сравнимую с радиусом заряда. В этих условиях происходит сильное ослабление ударных волн в воде, которое вызвано волнами разгрузки, идущими от свободной поверхности и дна водоёма. Исследовано движение и расширение газового пузыря в водоёме с ограниченными размерами. В отдельном разделе рассмотрен взрыв шнурового заряда массой 3250 кг и длиной 500 м в неоднородной среде Черного моря, проведенный в целях моделирования искусственного цунами. Отмечены особенности распространения взрывных волн в неоднород-

ной по скорости звука морской воде и приведены сведения о подводных звуковых каналах.

В главе 3 описаны этапы развития внешних явлений при подводном ядерном взрыве «Baker», проведенном США, с активным выбросом воды и образованием конденсационных облаков. Рассмотрены поверхностные явления при подводных взрывах, включая движение газового пузыря, проводящего к смещению поверхности воды с образованием ударных волн в воздухе, развитие купола и султана, при обрушении которого возникает как базисная волна, так и гравитационные волны (рисунок 2) Приведены параметры воздушной ударной волны у поверхности воды при подводных взрывах.



Рисунок 2 – Фотографии активной стадии развития подводного ядерного взрыва «Baker» 23 кТ на глубине 27,5 м при глубине акватории в районе взрыва около 60 м

В главе 4 рассмотрено действие подводных и прибрежных ядерных и крупных химических взрывов, проведенных на Новоземельском полигоне в период с 1955 по 1962 гг. Всего было проведено 3 подводных, 3 надводных и 1 прибрежный ядерный взрыв. Приведены данные о взрывах ядерных торпед Т-5 и их воздействие на надводные и подводные корабли в зоне

взрыва (рисунки 3, 4), зарегистрированные авторами монографии, принимавшими активное участие в их проведении. Рассмотрено действие на окружающую среду взрыва заряда тротила массой 1000 т на берегу пролива Маточкин Шар и ядерного взрыва мощностью 30 кг на берегу губы Черная, а также гидроакустические воздействия при подземных ядерных взрывах.



Рисунок 3 – Торпеда Т-5 с ядерным боезарядом и ее загрузка для проведения испытаний



Рисунок 4 – Основные стадии развития подводного ядерного взрыва торпеды с зарядом 10 кТ на глубине 30 м в бухте Чёрная (10.10.1957 г.)

В главе 5 приведены результаты регистрации подводной ударной волны и сейсмических колебаний на окружающей территории при подводных взрывах ВВ в Мертвом море, а также результаты изменений акустических волн в воде, воздухе и грунте при подводных взрывах тротила в Ладожском озере. Приведены параметры и характер затухания этих волн с

расстоянием, проанализированы их спектры.

В главе 6 представлены результаты исследования действия подледных и надледных взрывов ВВ при разрушении льда в интересах обеспечения судоходства в ледовых условиях, что может быть весьма полезно и при разработках морского подводного оружия ледового класса для борьбы с АПЛ подо

льдами Арктики. Проведено сравнение эффективности разрушения льда взрывами ВВ и различными источниками сжатых газов без участия ударной волны.

Глава 7 посвящена проблеме воздействия подводных взрывов на преграды и условиям их разрушения. Отмечена сложность этой проблемы. Приведены качественные соображения по взаимодействию подводной ударной волны с преградами и представлены современные теоретические подходы к решению этой проблемы.

В приложении приведены результаты экспериментальных исследований по воздействию подводных взрывов на подводных пловцов и некоторые биообъекты, находящиеся в воде. Отмечены пороговые параметры интенсивности воздействия в отношении различных уровней поражения от допустимых до критических.

Изданная монография была безвозмездно разослана по всем основным научно-техническим библиотекам РФ, а также в библиотечный фонд Военно-морской академии, военно-морских училищ, ведущих НИИ ВМФ, основным предприятиям и специалистам ОПК, связанным в своей деятельности со взрывотехникой. Большинство адресатов высоко оценили монографию.

В частности, Центральная военноморская библиотека МО РФ отметила, что имеющаяся литература по теме подводных взрывов «давно и безнадежно устарела и представляет ценность в основном с исторической точки зрения. Данная книга является бесценной и уникальной, поскольку в библиотеке нет новых книг по этой теме и нет подобной монографии, в которой были бы систематизированы сведения о результатах теоретических и экспериментальных исследований действия подводных и прибрежных взрывов».

В отзыве ВГКУ «12 ЦНИИ» МО РФ отмечена актуальность изучения всего комплекса явлений, присущих подводному взрыву, для создания эффективных образцов минно-торпедного оружия. Особый ин-

терес представляют данные об отечественных испытаниях на Новоземельском полигоне, многие из которых публикуются впервые. Обращено внимание на практическую значимость книги по знакомству читателей с экспериментально обоснованными характеристиками поражающего действия подводного и подледного взрывов, включая оценку действия подводных взрывов на корпуса судов и подводных лодок, а также на подводных пловцов. Без знания этих факторов, практически отсутствующих в имеющейся литературе, невозможна разработка эффективного подводного оружия.

Отзыв НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ обращает внимание на полезность обобщения авторами инструментальных наблюдений при проведении отечественных подводных ядерных взрывов, результаты которого дают новые представления о поражающих факторах ядерных взрывов с участием надводных кораблей разного класса, подводных лодок, а также прибрежных сооружений. Отмечена большая ценность опубликованных материалов экспериментальных исследований по воздействию подводных взрывов на человека и некоторые биологические объекты, находящиеся в воде.

Начальник НИИ спасания и подводных технологий ВМФ, выражая благодарность за изданную монографию, указал, что приведенные в ней материалы «представляют интерес не только с исторической и научно-познавательной стороны, но и позволяют использовать их в практической деятельности института». Отмечено, что «объем проделанной работы, количество и глубокий анализ информации, стиль изложения подтверждают общепризнанное мнение, что авторы монографии являются ведущими специалистами в области теории и практики подводных и прибрежных взрывов, учеными, обладающими фундаментальными знаниями, и патриотами России».

В большинстве отзывов других организаций также отмечено, что изложенные в

монографии материалы могут быть полезны для специалистов в области разработок подводного оружия и систем защиты от поражающих факторов подводных взрывов, а также для специалистов, разрабатывающих новые образцы морского оружия, и офицеров ВМФ, осваивающих их применение. Практически в каждом отзыве имеются просьбы выслать дополнительные экземпляры монографии, которые, к сожалению, не удалось удовлетворить, учитывая ограниченность первого тиража.

По отзывам специалистов, изданная Концерном монография «Подводные и прибрежные взрывы» представляет собой уникальное издание, за что необходимо выразить благодарность ее основному автору академику Виталию Васильевичу Адушкину, выполнившему труд, который был бы непосилен никому другому. Эта монография, безусловно, станет ему «памятником нерукотворным». Виталий Васильевич, несмотря на свой преклонный

возраст (а в этом году ему исполняется 88 лет), сумел обобщить свои материалы по подводным взрывам, оставляя их для использования следующим поколениям разработчиков и пользователей морского оружия, посвятив эту работу 75-летию образования НИИ-400.

По мнению академика В.В. Адушкина, необходимо отметить большую роль в подготовке к изданию монографии к.т.н. В.П. Дмитриченко, взявшего по своей инициативе за общее редактирование книги. Без его участия монография, скорее всего, не увидела бы свет. Творческое и ответственное отношение его к этой работе позволило выпустить монографию в прекрасном издании. Эту книгу не только полезно, но приятно изучать.

Рекомендую всем заинтересованным специалистам ознакомиться с этим уникальным научным изданием, выпущенным Концерном.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Спивак А.А. Виталий Васильевич Адушкин. Материалы к библиографии ученых. – М.: Наука, 2017.
2. Адушкин В.В., Христофоров Б.Д. Подводные и прибрежные взрывы. – СПб., 2019.

УДК 623.9

к.т.н. В.П. ДМИТРИЧЕНКО

#### ЮБИЛЕЙ УЧЕНОГО

К 90-летию профессора Л.Е. Собисевича.



Леонид Евгеньевич Собисевич, капитан 1 ранга в отставке, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии Совета министров СССР, заместитель директора Государственного научно-исследовательского центра прогнозирования и предупреждения геофизических техногенных катастроф, ученый секретарь Научного совета по прикладной геофизике РАН, председатель правления Межрегионального фонда социальной защиты населения от последствий радиационных и геоэкологических катастроф, главный научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем геоэкологии и вулканологии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Л.Е. Собисевич родился 27 апреля 1930 года в селе Малый Бобрик Краснопольского района Сумской области. Его юношеские годы совпали с тяжелым для всей страны временем – Великой Отечественной войной 1941-1945 гг. В эти годы он оказался в местах одного из самых ожесточенных танковых сражений и, по словам самого Леонида Евгеньевича, он «второй раз родился и был «крещен» под Прохоровкой».

После войны и завершения обучения в школе он поступил и в 1955 году окончил с отличием и золотой медалью Высшее военно-морское училище инженеров оружия. Обучение в училище Леонид Евгеньевич проходил на кафедре лауреата Государственной премии СССР, автора первой авиационной беспарашютной морской мины АМГ-1 Абрама Борисовича Геירו, которого Леонид Евгеньевич до сих пор вспоминает с большим уважением. Уже во время обучения у Л.Е. Собисевича прояви-

лись задатки ученого, который впоследствии стал известным специалистом в области морского подводного оружия.

По результатам учебы в училище приказом Главкома ВМФ СССР молодой офицер-минер был оставлен для продолжения обучения и научной работы в адъюнктура, которую он окончил в 1959 году, получив назначение на должность начальника лаборатории минного оружия Высшего военно-морского училища подводного плавания имени Ленинского комсомола.

В дальнейшем по личной просьбе Леонид Евгеньевич был переведен на научную работу в в/ч 26923, которая являлась морским филиалом головного института ВВС МО СССР. Служба в в/ч 26923 была неразрывно связана с участием в работах по созданию морских образцов вооружения и военной техники ВВС ВМФ. В этот период Леонид Евгеньевич проводит большой объем испытаний реактивной авиационной торпеды РАТ-52, что способствовало его дальнейшему научному росту.





С торпедой РАТ-52 на испытаниях и в музее Концерна

В это же время он начинает активно сотрудничать с НИИ-400 (затем ЦНИИ «Гидроприбор»), в опытных цехах которого он проходил практику еще будучи курсантом.

В 1962 году Л.Е. Собисевич успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, а в 1965 году ему было присвоено ученое звание старшего научного сотрудника по специальности «Автоматическое управление и регулирование авиационного оружия». Теперь он уже как молодой военный ученый активно развивает научное направление, связанное с созданием специальных информационно-измерительных систем подводного оружия. В своей первой монографии Леонид Евгеньевич выполнил теоретическое обобщение экспериментальных данных, отражающих физические явления, сопровождающие процесс истечения высокотемпературных турбулентных струй газа в жидкость. В это же время он публикует серию научных работ и статей, обобщающих результаты натурных экспериментальных исследований тонкой структуры геофизических полей, наведенных образцами вооружений и военной техники ВВС и ВМФ



в условиях, приближенных к боевой обстановке при проведении операций на море. Экспериментальные работы, выполняемые совместно с кандидатами технических наук А.А. Барихиным, В.Н. Кочедыковым (НИИ-400), Г.А. Веревитиным (в/ч 26923) и другими сотрудниками этих организаций, завершились созданием информационно-измерительных систем нового класса. Именно в это время Л.Е. Собисевич и А.А. Барихин, используя созданные ими векторно-фазовые приемники, выделили квазипоперечные волновые структуры в низкочастотных геоакустических полях, наведенных локальными источниками в слоистой морской среде типа «морское дно – водный слой – поверхность».

В 1960-е гг. очень остро стоял вопрос получения требуемой гидроакустической информации при испытаниях новых подводных систем. Малогабаритные измерительные магнитофоны, которые могли бы быть использованы в подводных образцах морского оружия, отсутствовали. Проблема была оперативно решена в отделе О.К. Троицкого (ЦНИИ «Гидроприбор»). Здесь на базе серийных авиационных фотокинопулеметов и малогабаритных

электронно-лучевых трубок в короткие сроки была создана информационно-измерительная система, которая позволила оперативно решить проблему изучения гидроакустических и псевдозвуковых полей подводного ракетного оружия. Известный ученый, лауреат Ленинской премии, профессор В.М. Шахнович высоко оценивал работы, которые оперативно выполнили сотрудники в/ч 26923 и ЦНИИ «Гидроприбор». Следует отметить, что отдельный цикл экспериментальных работ по изучению электромагнитных полей подвод-

ных ракет был проведен при участии будущего главного инженера ЦНИИ «Гидроприбор» к.т.н. А.Т. Скоробогатова.

В 1973 году Л.Е. Собисевич успешно защитил докторскую диссертацию, в которой рассмотрел отдельный класс актуальных задач ВМФ, позволивших решить проблему гидроакустической совместимости при комплексном применении противолодочного оружия и боевых систем ВМФ и ВВС в операциях на море на этапах поиска, сопровождения и поражения подводных лодок вероятного противника.



С автором статьи в мемориальном кабинете С.О. Макарова

В 1974 году приказом министра обороны СССР Л.Е. Собисевич был переведен для прохождения дальнейшей службы в секцию прикладных проблем и программ фундаментальных исследований при Президиуме Академии наук СССР. Одновременно много внимания Леонид Евгеньевич уделял научно-организационной деятельности по линии Высшей аттестационной комиссии. Несмотря на большую нагрузку по работе в новой должности, он продолжает активно сотрудничать с учеными и специалистами ЦНИИ «Гидроприбор» оказывая поддержку в подготовке научных кадров и постановке специализированных фундаментальных исследований, направленных на решение проблем гидроакустики, гео- и гидрофизики, механики сплош-

ных сред в интересах совершенствования инженерных систем минно-торпедного оружия ВМФ. В этот период Леонид Евгеньевич выполнил отдельный цикл работ вместе с д.т.н. О.А. Квятковским, к.т.н. В.Н. Кочедыковым, к.т.н. В.П. Дмитриченко, С.Г. Майсоном и рядом других специалистов по совершенствованию оригинальных конструкций низкочастотных комбинированных векторно-скалярных приемников, обеспечению виброустойчивости гидроакустических антенн систем самонаведения торпед, снижению шумности нового класса механизмов – «несоосных винтовых». На базе последних устройств в 1980-1988 гг. был создан новый тип бесшумных прецизионных приборов, которые по своим характеристикам превосходили зарубежные системы.

В 1981 году Леониду Евгеньевичу было присвоено ученое звание профессора по кафедре морских информационно-измерительных систем. Большой цикл работ, посвященный изучению гидрофизических полей летательных аппаратов различного вида и назначения, был обобщен им в очередной монографии, изданной в 1986 году, которая до сих пор является основополагающей научной работой по этой проблеме.

За комплекс специальных работ и успешную подготовку научных кадров высшей квалификации он был удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки и техники РФ», а в 1988 году Леониду Евгеньевичу была присуждена Государственная премия Совета министров СССР.

Л.Е. Собисевич – автор и соавтор ряда разработанных геофизических и гидрофизических методов, приборов и систем, что отмечено 49 авторскими свидетельствами на изобретения и патентами. За активную изобретательную деятельность ему было присвоено почетное звание «Заслуженный изобретатель СССР».

В 1989 году после завершения службы в МО СССР профессор Л.Е. Собисевич перешел на работу главным научным сотрудником лаборатории фундаментальных проблем геоэкологии и вулканологии института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и продолжает трудиться в этой должности по настоящее время. Здесь, казалось бы, в совершенно другой области науки, Леонид Евгеньевич сумел внести значительный вклад в решение проблем геофизики, включая развитие теории резонансных взаимодействий в слоистых геофизических средах, совершенствование методов и средств активной сейсмологии, изучение сейсмоактивных флюидно-магматических систем Северного Кавказа и магнитных возмущений, наводимых в геосферах при созревании крупных сейсмических событий. При этом проявились и прекрасные организаторские способности Леонида Евгеньевича: в частности, им была создана Северо-

Кавказская геофизическая обсерватория, которая была образована в лучших традициях русской геофизической школы.

Новый взгляд на проблемы сейсмологии и исключительное чутье естествоиспытателя позволили Леониду Евгеньевичу сформулировать и экспериментально подтвердить основные принципы прогнозирования мощных разрушительных землетрясений. Л.Е. Собисевич является признанным ученым высшей квалификации в области геоакустики, прикладной геофизики и геоэкологии. В числе его последних достижений – разработки научных основ новых геофизических технологий двойного назначения. Он автор 12 монографий и более 360 статей. К основным достоинствам его научных публикаций следует отнести ясность изложения, четкую направленность на решение актуальных прикладных проблем с использованием современных математических и экспериментальных методов.

Научные интересы профессора Л.Е. Собисевича сосредоточены на ключевых проблемах гидроакустики, прикладной гео- и гидрофизики, включая такие разделы, как:

- теория и методы экспериментальных исследований геофизических и гидрофизических (акустических, гидроакустических, сейсмических, гидродинамических и электромагнитных) полей;

- мониторинг волновых процессов, генерируемых в литосфере и других геосферах в результате внешних и внутренних воздействий, с учетом эволюции локализованных неоднородных структур дилатантного типа, активно влияющих на изменение окружающей среды;

- построение технологии аппаратного мониторинга сейсмической активности, вариаций наклонов и деформаций земной поверхности, составляющих магнитного поля Земли, атмосферного давления, вторых производных гравитационного потенциала, приливного фактора и температуры окружающей среды с целью получения натуральных данных о короткопериодных перестройках в окружающей среде;

- изучение аномальных геофизических процессов в геосферах Земли и прогнозирование разномасштабных сейсмических и техногенных катастроф;

- фундаментальные проблемы волновых геоакустических взаимодействий на шельфе и в глубоководной части Северного Ледовитого океана.

В течение последних лет он возглавляет работы по проблеме создания нового поколения мобильных информационно-измерительных комплексов экспериментальной геофизики на базе высоких конверсионных технологий, успешно ведет работы по грантам Российского фонда перспективных исследований, продолжая сотрудничество со специалистами АО «Концерн «МПО – Гидроприбор».

В 2017 году по его инициативе в Концерне была организована внештатная лаборатория фундаментальных проблем морского подводного оружия для привлечения к решению этих проблем ведущих ученых РАН и высшей школы РФ. Руководителем лаборатории назначен сын Леонида Евгеньевича – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук Алексей Леонидович Собисевич. За два года работы внештатной лаборатории к обсуждению и решению проблем морского оружия были привлечены академики РАН В.В. Адушкин, О.В. Руденко, И.В. Каляев, а также кандидаты физико-математических наук Р.А. Жостков, Д.В. Лиходеев, Д.А. Преснов и ряд других специалистов РАН. Некоторые результаты работы внештатной лаборатории в виде научных статей представлены в данном сборнике.



Профессор Л.Е. Собисевич с академиками РАН О.В. Руденко (а), В.В. Адушкиным (б), вице-президентом АО И.В. Каляевым (в) в музее Концерна

Профессор Л.Е. Собисевич всегда уделяет большое внимание использованию научных результатов как в конверсионном приложении, так и в интересах повышения обороноспособности России, консультируя ученых и специалистов, связанных с созданием новых видов вооружения и военной техники, организуя и непосредственно участвуя в исследованиях на созданных геофизических полигонах. Основные его изобретения реализованы в конкретных образцах вооружения, в космической и авиационной технике, технике ВМФ, а использование предложенных теоретических методов позволило повысить эффективность современных геофизических приборных комплексов. По его инициативе

подготовлены предложения по обеспечению мониторинга подледных акваторий северных морей и защите Арктики от бесконтрольного подхода к границам РФ атомных подводных ракетноносцев стран НАТО.

Под непосредственным руководством Леонида Евгеньевича совместно со специалистами АО «Концерн «МПО – Гидроприбор» был создан макет принципиально нового типа сверхнизкочастотного датчика геоакустических колебаний ледового класса для изучения распространения поверхностных волн в среде «морское дно – подледная акватория – ледовый покров». Макет успешно прошел натурные испытания в ледовых условиях, что позволило



сформировать предложения по созданию системы освещения подлёдной обстановки, а также исследованию структуры морского

дна для поиска месторождений углеводородов в подледной акватории северных морей в Арктике.



С изготовителями макета «ледового буя»  
А.М. Керимовым (слева) и И.М. Врублевским (справа) в «Гидроприборе»

В педагогической деятельности профессор Л.Е. Собисевич всегда стремится передать своим ученикам многолетний опыт экспериментатора, широко используя в лекционных курсах результаты полевых наблюдений. Он разработал и прочитал новый курс лекций по теории гидрофизических полей летательных аппаратов на приборостроительном факультете Ленинградского кораблестроительного института. В рамках этого курса подготовлен и издан ряд учебных пособий, которые высоко оценены

научной общественностью. Много внимания уделяет Л.Е. Собисевич и подготовке специалистов высшей квалификации. За два десятилетия им создана научная школа из военных и гражданских специалистов, 12 из которых под его руководством стали кандидатами, а 4 – докторами наук. Леонид Евгеньевич – член специализированных советов по защите докторских диссертаций и научно-технических советов ОИФЗ РАН, ГНИЦ ПГК при Кубанском госуниверситете Минобробразования России, НИИ Погранвойск.



В настоящее время Л.Е. Собисевич продолжает напряженную научно-исследо-

вательскую и научно-организационную деятельность. В течение последних восьми лет

он возглавляет работы по проблеме, создания нового поколения мобильных информационно-измерительных комплексов (систем) экспериментальной геофизики на базе высоких конверсионных технологий, успешно ведет работы с АО «Концерн «МПО – Гидроприбор» и другими организациями, до недавнего времени регулярно организовывал и проводил комплексные экспедиции в сеismoопасные регионы России.

Леонид Евгеньевич – человек неординарный, сочетающий в научной работе

консервативные принципы с неожиданными, взрывными решениями, нестандартными и смелыми подходами, неисчерпаемый генератор новых гипотез, которые, как свидетельствует история, зачастую оказываются пророческими.

От всей души желаем Леониду Евгеньевичу крепкого здоровья, долгих и плодотворных лет жизни, большого человеческого счастья и дальнейших успехов во всех областях его многогранной деятельности.

*д.т.н. Л.Е. СОБИСЕВИЧ*

## **К ВОПРОСУ О РОЛИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СОЗДАНИИ МОРСКОГО ПОДВОДНОГО ОРУЖИЯ**

В статье представлены размышления автора, в прошлом военно-морского минера, о роли научных исследований в создании морского подводного оружия в исторической ретроспективе.

Ученые Российской академии наук и моряки были одними из первых, кто изобрел морскую мину. Своим научным подвигом они обеспечили России ведущую роль в развитии и боевом применении созданных уникальных образцов минного оружия. Именно в России впервые было применено электричество для взрыва мины и сделан ряд других изобретений в этой области. Так, в числе строившихся на воронежских верфях кораблей для Азовского флота (1696 г.) были построены четыре брандера, которые предназначались для уничтожения кораблей противника.

Выдающиеся фундаментальные открытия и изобретения русских ученых в области электричества явились прикладной технической и научной базой, на основе которой уже с 1830-х гг. началось успешное развитие русского минного оружия. Во время Крымской войны 1853-1856 гг. русские моряки впервые в истории боевых действий на море использовали минное оружие для обороны своего побережья. Академик Российской академии наук Б.С. Якоби не только создавал новые образцы морских мин, но и принимал активное участие в подготовке русских минеров. Русские гальванические мины того времени можно было назвать совершенными.

Переход от парусного флота к броненосному в середине XIX века был вызван в первую очередь достижениями фундаментальной науки и созданных на ее базе прикладных технологиях. Этот процесс сопровождался появлением броненосных кораблей и дальнейшим развитием военно-мор-

ских боевых систем, включая нарезную артиллерию, якорные мины и торпеды.

В годы русско-турецкой войны 1877-1878 гг. над дальнейшим усовершенствованием минно-торпедного оружия начал работать один из передовых деятелей русского флота, будущий выдающийся флотоводец и ученый адмирал Степан Осипович Макаров. Его деятельность и достижения в создании и усовершенствовании минно-торпедного оружия трудно переоценить. Макаров предложил гидростатический способ автоматической постановки мин на заданное углубление, разработал методы обеспечения безопасного обращения с минами, повысил их живучесть, разработал тактические приемы применения минного оружия в операциях на морских театрах. По предложению С.О. Макарова в России с 1877 г. мины стали снаряжать не порохом, а пироксилином.

Русско-японская война 1904-1905 гг. заставила пересмотреть представления о развитии минного оружия. Фундаментальные работы адмирала С.О. Макарова и других офицеров флота, таких как адмиралы Г.И. Бутаков и А.А. Попов, капитан 2 ранга В.А. Куприянов, лейтенанты Н.Н. Азаров и Н.Ф. Максимов, стали определяющими в минном оружии. В этот период были решены многие прикладные задачи, изменившие облик минного оружия, которое затем активно применялось русскими минерами в период Первой мировой войны.

Говоря о современных фундаментальных и прикладных проблемах, определяющих пути развития минно-торпедного оружия ВМФ, следует отметить, что к настоя-

щему времени нет точных критериев их разделения. Применительно к развитию конкретных систем вооружений и военной техники ВМФ принято считать, что фундаментальные науки – это система знаний о глубоких свойствах окружающей среды, в которой применяются существующие образцы вооружения. Фундаментальные знания позволяют создавать новые теоретические построения, объясняющие все процессы, происходящие при боевом использовании оружия, с выходом на перспективные научные направления в развитии нового поколения боевых систем. Прикладные науки – это система знаний, имеющая выраженную практическую ориентацию. Эти знания концентрируют весь предыдущий экспериментальный опыт, который был получен на этапе испытаний опытных образцов вооружения и при дальнейшем его боевом использовании на театрах военных действий.

Ценность фундаментальных исследований заключается не только в формировании новых научных направлений в развитии вооружения и военной техники ВМФ в ближайшей перспективе, но и в том, что они позволяют поддерживать высокий научный уровень текущих прикладных исследований. В совокупности эти исследования связаны с совершенствованием и модернизацией существующего вооружения и военной техники ВМФ. Сравнительно невысокий уровень современных теоретических исследований в некоторых отраслевых институтах объясняется сегодня отсутствием специализированных научных работ, посвященных конкретным фундаментальным проблемам, существующим на современном этапе развития вооружения и военной техники. Особенно остро этот вопрос сегодня стоит в развитии оборонных отраслей промышленности, в том числе и в развитии морского подводного оружия.

В послевоенное время представители заказчика в лице государства понимали, что в большинстве случаев фундаментальные исследования – это работа на

будущее. Нежелание остаться без перспективных образцов вооружения из-за отсутствия фундаментальных научных разработок приводило к осознанной необходимости финансировать фундаментальные исследования. В этот период, когда в научно-исследовательские институты пришли специалисты с боевым опытом, которые хорошо усвоили уроки великой Победы, вопрос о проведении фундаментальных работ при обосновании перспективных образцов вооружения и военной техники не обсуждался. Такие исследования велись широким фронтом, и многие фундаментальные работы окончились созданием принципиально новых направлений в построении подводного морского оружия. Однако сегодня такая практика не получает поддержки у многих военных руководителей высокого ранга.

Общение с военными заказчиками при решении вопроса о финансировании перспективных научных направлений показывает, что именно здесь и возникает серьезная проблема отделения тех исследований, которые могут обходиться немедленной реализацией собственного продукта и не требуют финансирования, от тех, которым требуется специальное финансирование. Поясним это положение на нескольких исторических примерах.

Идея нанесения кораблю подводного удара впервые получила практическое решение в России. Русским ученым и морякам-изобретателям принадлежит честь создания первых морских мин, а также ряд других важнейших достижений в области минного оружия. Фундаментальные открытия физиков и химиков позволили инженерам создать электрические взрыватели для оснащения якорных мин, которые массово использовались и в Великой Отечественной войне при проведении операций на морских театрах военных действий.

Однако в период с 1917 по 1940 гг. фундаментальные исследования, направленные на развитие боевых систем ВМФ,

по вполне объективным причинам не получили необходимой финансовой поддержки, что не могло не отразиться на развитии минного оружия и вооружения. Предпочтение отдавалось авиации, артиллерии и войсковым образованиям, которые



Рисунок 1 – Подводное морское оружие довоенного периода

Были и новые разработки в области создания морских мин с контактными взрывателями. В качестве примера можно привести беспарашютную авиационную мину, созданную в предвоенные годы выдающимся минером, лауреатом Сталинской премии Абрамом Борисовичем Гейро. Авиационные мины А. Гейро при-

активно строились для защиты завоеваний социализма. Результаты не заставили себя долго ждать. Приближалась война, и моряки собирались применять в основном устаревшие образцы минно-торпедного оружия.

менялись в советско-финской войне и показали высокую эффективность при решении задач, связанных с блокированием морских баз противника в зимних условиях.

Начавшаяся вскоре Великая Отечественная война поставила перед флотом новые задачи.

В ночь с 21 на 22 июня над Севастополем были замечены первые немецкие самолеты, которые провели минирование морской акватории, а утром 22 июня началась бомбардировка как Севастополя, так и кораблей, стоящих в бухте и на рейде. Выставленные авиацией противника морские донные магнитные мины наносили ущерб нашему флоту, который оказался заблокированным в севастопольской бухте и на других военно-морских базах. Возникли серьезные трудности с тралением выставленных донных мин.

К этой проблеме были привлечены специалисты флота и ведущие ученые Академии наук СССР. Оперативные исследования позволили установить, что фашисты применили донные магнитные мины, снабженные приборами срочности и кратности, а также устройствами, которые производили подрыв мины при попытке ее разоружить. Для борьбы с этим новым типом морского минного оружия потребовалось решить ряд сложных фундаментальных задач. Специалисты флота разоружали обнаруженные донные мины и ценой собственных жизней получали полезную информацию. Новые научные данные об основных характеристиках магнитных взрывателей позволили академикам И.В. Курчатову и А.П. Александрову вместе с группой академических и военных ученых оперативно приступить к изучению и решению крупной фундаментальной проблемы – поиска путей размагничивания боевых кораблей. Определяющие задачи в короткие сроки были решены, что позволило защитить боевые корабли от подрывов на магнитных минах при проведении боевых операций на морских театрах военных действий. Одновременно были начаты разработки перспективного отечественного минно-торпедного оружия, снабженного неконтактными взрывателями. В 1940-е гг. одним из таких образцов стала мина КБ с акустическим взрывателем КРАБ.

Характеризуя развитие подводного морского оружия в период Великой Отечественной войны, следует остановиться и на

работе наших противников, немецких ученых, усилия которых были направлены на изучение Мирового океана. Специализированные фундаментальные исследования имели целью обеспечить успешные боевые действия германского подводного флота в Атлантике и в других районах Мирового океана. Экспериментальные работы по изучению прежде всего акустики океана велись прямо на боевых кораблях и подводных лодках, выполнявших поставленные боевые задачи. Одновременно с анализом получаемой научной информации о Мировом океане немецкие ученые использовали ее в процессе разработки нового поколения гидроакустических систем, позволяющих контролировать боевую обстановку в районе действия подводных лодок, которые объединялись в «волчьи стаи» и уничтожали танкеры и боевые корабли наших союзников в Атлантике. Именно в этот период немецким ученым удалось завершить серию крупных научных работ и на их базе создать не имеющую мировых аналогов, уникальную по тактико-техническим характеристикам самонаводящуюся электрическую торпеду. Потери на море как у нас, так и у наших союзников сразу резко выросли.

Немцы глубоко засекретили новую торпеду, и первые сведения о ней советским морским специалистам удалось получить только в конце войны, когда была поднята на поверхность потопленная немецкая подводная лодка с самонаводящимися электрическими торпедами на борту.

На приведенном примере становится ясной роль масштабных скоординированных фундаментальных и прикладных исследований, в которых одновременно участвуют ученые НИИ и специалисты флота. Такой подход позволил немецким специалистам изучить геоакустические поля кораблей и подводных лодок в различных районах Мирового океана, а полученную научную информацию использовать при создании принципиально нового класса самонаводящегося торпедного и уникального минного оружия.

Захваченные торпеды были настолько технологичны, что только в 1950-е гг. нашим специалистам удалось в полном объеме наладить изготовление аналогичных отечественных электрических самонаводящихся торпед. Эти работы были успешно выполнены при активном участии ведущих ученых АН СССР. Возникающие при этом фундаментальные задачи, которые стояли перед советской военной наукой, глубоко понимали руководители высокого ранга в судостроительной промышленности и на флоте.

События на фронтах Великой Отечественной войны дали толчок развитию нового поколения минно-торпедного оружия ВМФ. Приказом Народного комиссара судостроительной промышленности № 54 в 1944 году во исполнение распоряжения Комитета обороны СССР создается минно-торпедно-тральный институт (НИИ-400) в Ленинграде. Проблемам, связанным с развитием минно-торпедного оружия, стали уделять больше внимания.

Известно, что в 1947 году адмирал флота СССР Н.Г. Кузнецов докладывал



Рисунок 2 – Здание, в котором с 1951 по 1959 гг. размещалось Высшее военно-морское училище инженеров оружия в Ленинграде

Николай Герасимович Кузнецов был во всех отношениях выдающимся военным руководителем. В нем сочетались такие человеческие достоинства, как глубокое стратегическое мышление военного специалиста, обеспечившее успешное руководство

И.В. Сталину о состоянии дел на флоте и в частности обрисовал проблемы, связанные с состоянием минно-торпедного оружия: «Мы получили трофейные корабли, тем самым частично возместив наши военные потери. Однако с подводным оружием дела обстоят неблагоприятно. Необходимо вернуть подготовку специалистов высшей квалификации». На это Сталин ответил вопросом: «Кузнецов, разве у тебя не хватает власти? Создай нужные военно-морские училища». «Власти у меня хватает, товарищ Сталин, нет подходящих зданий», – ответил адмирал. Сталин походил по кабинету, подумал и сказал: «В Ленинграде достаточно пустующих дворцов».

Через несколько дней Н.Г. Кузнецов подписал приказ о создании нескольких военно-морских училищ, в числе которых было и Высшее военно-морское училище инженеров оружия, которому руководство флота СССР отводило особую роль. Оно разместилось в недостроенном перед войной здании ленинградского Дворца советов.

боевыми действиями флота, и научные знания крупного ученого, понимающего роль военных приложений фундаментальной и прикладной науки в развитии отечественного кораблестроения, вооружения надводных кораблей и подводных лодок.

Высшее Военно-морское училище инженеров оружия готовило военных ученых. Его учебные планы включали фундаментальные университетские курсы физики, математики, химии, которые позволяли курсантам свободно усваивать знания по специальным разделам морского оружия. Нужно отметить, что уже на первых специальных занятиях курсанты начали изучать морское оружие противника. Немецкие морские мины и торпеды, тральное и химическое оружие, ракеты ФАУ-1 и ФАУ-2, артиллерийские системы и приборы управления стрельбой, специальное вооружение, включая разработки других иностранных флотов, заполнили учебные классы и лаборатории.

Практические занятия курсантов предусматривали стажировку на заводах Ленинграда, в лабораториях ЦНИИ «Гидроприбор» и других оборонных НИИ. Летняя ежегодная практика проходила на кораблях

ВМФ. После пятилетнего обучения и преддипломной практики на флоте курсанты приступали к работам над дипломами. Для написания диплома отводилось до семи месяцев. Уже первые защиты дипломных работ свидетельствовали о высокой научной подготовке молодого поколения военных ученых, специалистов в области морского вооружения. Подчеркнем, что многие дипломные работы принимались для дальнейшего использования в НИИ, куда выпускники распределялись для дальнейшего прохождения службы.

Подводя итоги подготовки нового поколения ученых ВМФ, отметим, что полученные многими выпускниками Высшего военно-морского училища государственные премии за участие в выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ свидетельствуют о правильной научной политике, проводимой руководством флота СССР.



Рисунок 3 – Морские мины, торпеды и минно-торпедные комплексы советского периода

К сожалению, в 1960-е годы Н.С. Хрущев бездумно разрушил все, что создавал Николай Герасимович Кузнецов. Мы не будем здесь выяснять причины случившегося. Укажем только, что эти действия высшего руководства страны отрицательно отразились на развитии подводного морского оружия. Ушло без смены старшее поколение специалистов и ученых, перестали проводиться фундаментальные работы, являющиеся основой построения новых подводных боевых систем. В результате к концу столетия флот пришел не с лучшими показателями в рассматриваемой области. А ведь минно-торпедное оружие остается практически единственным эффективным средством борьбы с АПЛ потенциального противника.

Современная военно-морская наука должна обязательно опираться на фундаментальные работы (производство нового фундаментального знания) и прикладные исследования (использование этого знания при создании образцов подводного вооружения и военной техники ВМФ). Усиление

взаимопроникновения фундаментальных и прикладных знаний в современных условиях приводит к становлению качественно нового типа исследований, диалектически сочетающих в себе особенности этих двух традиционно противопоставляемых направлений. Развитие фундаментальной и прикладной науки должно идти в тесной взаимосвязи.

Понимая это, руководство АО «Концерн «МПО – Гидроприбор» в 2017 г. активно поддержало мое предложение заключить договор о творческом сотрудничестве Концерна с РАН и организовало внештатную лабораторию фундаментальных и прикладных проблем МПО. Отдельные научные результаты, полученные учеными внештатной лаборатории в 2018-2019 гг., представлены в данном сборнике. Они послужат началу процесса «фундаментализации» исследований при создании нового поколения морского подводного оружия, в том числе ледового класса, а также формированию научно-технического задела для освоения Концерном систем двойного назначения.

## АННОТАЦИИ

УДК 623.98

Ключевые слова: фундаментальные исследования, сотрудничество с РАН, внештатная лаборатория, сейсмоакустический мониторинг, подледная акватория, защита Арктики.

Патрушев В.В., Собисевич А.Л. Внештатная лаборатория фундаментально-прикладных проблем морского подводного оружия. Первые научные результаты. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 5-11.

В статье рассмотрены причины, побудившие к созданию в Концерне внештатной лаборатории, направления работ и задачи, поставленные перед лабораторией на 2018-2019 гг., а также кратко представлены результаты этих работ, более подробно изложенные в статьях сборника.

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: научные исследования Арктики, информационно-измерительные системы, ледовые учения ВМС стран НАТО, соперники России в арктическом регионе, повышение боевой эффективности подводного флота стран НАТО.

Собисевич Л.Е., Дмитриченко В.П., Лиходеев Д.В. Обзор современных арктических исследований стран НАТО в интересах военно-морских сил. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 12-28.

На основе анализа открытых зарубежных публикаций проведен обзор современного состояния и масштабов исследований, активно проводимых странами НАТО в Арктике, дана оценка их направленности на решение военно-технических проблем.

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: фундаментальные и прикладные исследования, эффекты нелинейной акустики, нелинейные волны в природе и технике, приложения нелинейной акустики.

Руденко О.В. Некоторые тенденции в развитии фундаментальных направлений нелинейной акустики. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 28-37.

Статья обращает внимание на необходимость фундаментальных исследований на примере ряда характерных примеров нелинейных эффектов в различных областях науки и техники. Изложены основные принципы подхода к решению и исследованию этих эффектов, составляющих специальные разделы нелинейной акустики.

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: акустические процессы в слоистых структурах морской среды, подводные информационно-измерительные системы, помеховая обстановка, геоакустические поля, формирование сейсмоакустических полей в слоистой морской среде, квазиперпендикулярные волны вблизи морского дна.

Рази А.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. Современные математические подходы в задачах анализа волновых процессов. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 38-53.

В статье приведены результаты анализа наиболее характерных акустических процессов, протекающих в слоистых структурах морской среды. Значительный интерес представляет совместное рассмотрение волновых процессов, происходящих в морской среде с учетом ее взаимодействия с атмосферой и дном моря. Эти процессы формируют помеховую обстановку и являются источниками полезной информации. Рассмотрены вопросы возможности обнаружения детальных аппаратов из-под воды, а также дальнего обнаружения ПЛ при регистрации квазиперпендикулярных волн с использованием векторных приемников как в воде, так и в скважинах на суше.



УДК 550.34.03

Ключевые слова: освещение подледной обстановки, мониторинг слоистой морской среды, обнаружение обесшумленных АПЛ, геоакустические антенные системы ледового класса.

Агафонов В.М., Дмитриченко В.П., Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. Предложения по созданию инновационной геоакустической антенной системы ледового класса для мониторинга арктических морей. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 54-63.

Проведен анализ возможности создания геоакустических антенных систем ледового класса, предназначенных для мониторинга морской среды подо льдом. Показано, что при создании таких систем следует применять специализированные ледовые буи для регистрации сейсмо- и гидроакустических колебаний с использованием геоакустических антенных систем мониторинга морских акваторий Арктики с поверхности ледового покрова. Результаты лабораторно-стендовых испытаний макета геоакустического буя показали, что он может быть использован в качестве основного звена подобных систем ледового класса.

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: поверхностные волны рэлеевского типа, мониторинг морской среды, геоакустические технологии мониторинга, томографическое восстановление глубинной структуры морской среды.

Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Сейсмоакустический мониторинг глубинных структур морской среды при наличии ледового покрова на основе анализа распространения изгибно-гравитационных волн // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 64-72.

Изложены новые научные результаты теоретических и экспериментальных исследований геоакустических волновых процессов в слоистой гидрофизической среде типа «ледовый покров – водный слой – морское дно», проведенных с привлечением инновационных технологий, включая томографические оценки параметров скоростных неоднородностей по шумам, зарегистрированным на границах исследуемого района моря. Представлены результаты анализа процессов затухания изгибно-гравитационных волн, распространяющихся вдоль границ раздела слоистой гидрофизической среды. Изучены дисперсия и превращения волновых структур в другие типы волн, распространяющихся вдоль морского дна.

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: слоистые структуры арктических морей, поверхностные акустические волны, фундаментальная и изгибная моды.

Груздев П.Д., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А. Математическое моделирование и экспериментальные исследования распространения и трансформации поверхностных волн на границах раздела морской среды в ледовых условиях. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 73-80.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования поверхностных геоакустических волн, распространяющихся в слоистой среде типа «литосфера – гидросфера – ледовый покров». Выделены основные типы поверхностных волн, включая фундаментальную моду, распространяющуюся преимущественно вдоль границы морского дна и водного слоя, и изгибную моду, сосредоточенную в ледовом покрове. Выполнены оценки определяющих параметров среды на фазовые скорости поверхностных волновых структур. Осуществлено разделение фундаментальной моды и изгибной моды в процессе анализа экспериментальных данных, полученных в сложных ледовых условиях.

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, слоистая морская среда, ледовые условия, зондирование морского дна в ледовых условиях.

Дмитриченко В.П., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А. Дистанционное зондирование морского дна при наличии ледового покрова. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 81-90.

В статье с помощью численного моделирования методом конечных элементов показано, что для получения данных о глубинном строении морского дна достаточно информации о поверхностных волнах, получаемых с помощью сейсмостанций, устанавливаемых на ледовом покрове. Это возможно благодаря быстрой фундаментальной моде, несущей информацию о донной структуре и имеющей локальный максимум вблизи ледового покрова. Полученные результаты позволяют упростить технологию зондирования морского дна при проведении оперативной сейсморазведки углеводородов на шельфе северных морей, покрытых льдом, на основе анализа распространения микросейсмических колебаний

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: низкочастотные гидроакустические сигналы, пьезокерамические гидрофоны, молекулярно-электронные приемники, экспериментальные исследования.

Авдюхина С.Ю., Агафонов В.М., Бугаев А.С., Груздев П.Д., Данилова В.Г., Егоров Е.В., Зайцев Д.Л. Сравнительные характеристики пьезокерамических и молекулярно-электронных приемников низкочастотных гидроакустических сигналов // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 91-97.

В статье описаны принципы работы и приведены сравнительные характеристики пьезокерамических и молекулярно-электронных гидрофонов. Рассмотрены перспективы их использования в специализированных информационно-измерительных системах ледового класса.

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: скрытность мин и минных комплексов, акустическая маскировка морских мин, струнный механизм демпфирования, эффективность маскировки.

Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. О возможности акустической маскировки морских мин. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 98-101.

Рассмотрена и теоретически обоснована принципиальная возможность решения одной из актуальных проблем создания морских мин – обеспечение их акустической незаметности, т. е. маскировки, при использовании резонансных звукопоглощающих систем, размещаемых вблизи корпуса мины. Показана достаточно высокая расчетная эффективность предложения.

УДК 530.343, 534.11

Ключевые слова: помехогенные факторы, шумы и помехи, полезный сигнал, сейсмоакустическая запись, адаптивная фильтрация.

Гравиров В.В., Кислов К.В. Применение техники адаптивной фильтрации в геоакустических системах. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 102-111.

В статье на примере анализа геодинамических процессов в геосферах Земли развивается технология применения техники адаптивной фильтрации для удаления нежелательных шумов на записях сейсмических приборов.

УДК 623.933

Ключевые слова: системы освещения подводной обстановки, гидроакустические буи, дистанция обнаружения ПЛ-цели, пьезокерамические излучатели.

Дмитриченко В.П., Калминский Б.Г. Оценка потенциальных возможностей обнаружения подводных лодок малогабаритными гидроакустическими буями. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 112-117.

В статье рассмотрены результаты расчетной оценки потенциально достижимой дальности обнаружения подводных лодок активными малогабаритными гидроакустическими буями с использованием пьезокерамических антенн.

УДК 629.735.4:537.63

Ключевые слова: беспилотные технические системы, дроны, винтовые летательные аппараты, геофизические поля, гравитоманнитные поля, автономные системы поражения дронов.

Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. Гравитоманнитные поля, наводимые вихревыми образованиями винтовых летательных аппаратов. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 118-126.

Приведены теоретические предпосылки и отдельные результаты натурных наблюдений, позволяющие сформировать общее представление о гравитоманнитных полях вертолетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Война в Сирии показала, что различные беспилотные технические системы (БТС), в составе которых выделяются БПЛА, могут с успехом использоваться в боевых операциях и на суше, и в море. В этой связи появились и новые требования к развиваемому поколению мино-ракетных комплексов, которые смогут уничтожать вертолеты и БПЛА, в том числе из-под воды, на этапе их полета к объекту поражения.

УДК 681.883:532.517.4

Ключевые слова: турбулентность пограничного слоя, псевдозвук, акустическое излучение, изгибные колебания.

Гессен В. Р. О влиянии изгибно-колеблющейся структуры вблизи приемника звукового давления на его работу в турбулентном пограничном слое. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 127-132.

Рассмотрено воздействие псевдозвука турбулентности пограничного слоя на неоднородность его границы. Представлено решение, показывающее трансформацию псевдозвука в акустическое излучение на неоднородностях различных типов, в том числе содержащих звукопрозрачную и полубесконечную пластину с импедансом изгибных колебаний. Приведены результаты расчетов такого излучения при воздействии однородного поля турбулентности.

УДК 626.9

Ключевые слова: монография, подводные взрывы, рецензия, отзывы.

Сухопаров П. Д. Монография академика В.В. Адушкина «Подводные и прибрежные взрывы». // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 133-138.

В статье кратко проанализировано содержание уникальной монографии, изданной Концерном к 75-летию образования НИИ-400, и приведены выдержки из отзывов о ней ведущих специалистов ВМФ и ОПК, которые дают ей высокую оценку.

УДК 623.9

Ключевые слова: юбилей, трудовая деятельность, научная деятельность, заслуженный деятель.

Дмитриченко В. П. Юбилей ученого. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 139-145.

К 90-летию профессора Л.Е. Собисевича.

УДК 623.98

Ключевые слова: фундаментальные исследования, прикладные исследования, развитие морского подводного оружия, система подготовки специалистов.

Собисевич Л. Е. К вопросу о роли фундаментальных и прикладных исследований в создании морского подводного оружия. // Подводное морское оружие. 2020. Вып. 4(52). С. 146-152.

В статье представлены размышления автора, в прошлом военно-морского минера, о роли научных исследований в создании морского подводного оружия в исторической ретроспективе.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Авдюхина С.Ю.** – инженер-конструктор лаборатории «Центр молекулярной электроники» МФТИ

**Агафонов В.М.** – к.т.н., доцент, руководитель лаборатории «Центр молекулярной электроники» МФТИ

**Бугаев А.С.** – д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова

**Гессен В.Р.** – ведущий научный сотрудник АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»

**Гравиров В.В.** – к.ф.-м.н., с.н.с., Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

**Груздев П.Д.** – ведущий инженер АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»

**Данилова В.Г.** – преподаватель кафедры проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов СПбГМТУ

**Дмитриченко В.П.** – к.т.н., с.н.с., начальник отделения – главный конструктор АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»

**Егоров Е.В.** – к.ф.-м.н., с.н.с., лаборатория «Центр молекулярной электроники» МФТИ

**Зайцев Д.Л.** – к.ф.-м.н., с.н.с., заместитель декана факультета проблем физики и энергетики МФТИ

**Жостков Р.А.** – к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем геоэкологии и вулканологии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Калминский Б.Г.** – к.т.н., с.н.с., начальник сектора АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»

**Кислов К.В.** – к.ф.-м.н., с.н.с., Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

**Лиходеев Д.В.** – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем геоэкологии и вулканологии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Патрушев В.В.** – генеральный директор АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»

**Преснов Д.А.** – к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем геоэкологии и вулканологии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Ракин А.В.** – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела радиоастрономических исследований космических объектов и сред ФГБНУ НИРФИ

**Руденко О.В.** – д.ф.-м.н., академик РАН, заведующий кафедрой акустики МГУ, главный научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем геоэкологии и вулканологии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Собисевич А.Л.** – д.ф.-м.н., член-корр. РАН, заместитель директора Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН по научной работе

**Собисевич Л.Е.** – д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, главный научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем геоэкологии и вулканологии Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Сухопаров П.Д.** – заместитель генерального директора АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»

Научно-технический сборник  
«Подводное морское оружие»

Вып. 4 (52) 2020

---

Подписано в печать 17.06.2020 г.  
В сборнике 17 статей  
Формат 60x80 1/6. Бумага офсетная. Печ. л. 8,5  
Тираж 100 экз.

---

Подготовлен и отпечатан в  
ГНЦ РФ АО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»  
194044, Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., 24  
телефон: (812) 542-01-47, факс: (812) 542-96-59, e-mail: info@gidropribor.ru