

СЕКЦИЯ 2

Технические средства и методы акустических, геофизических и физико-химических исследований океана, биотехнологии и экология

МАЛОГАБАРИТНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ
ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ ОСВЕЩЕНИЯ БЛИЖНЕЙ ОБСТАНОВКИ
ДЛЯ ОСВОЕНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

**И.Ю. Аникин¹, В.П. Дмитриченко², В.П. Захряпин¹, В.Б. Каменев¹, В.Л. Тандит¹,
А.В. Тандит¹**

¹ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30, тел.: (495) 6602301, факс: (495) 6605866,
e-mail: anikin@igas.ru, <http://www.elektropribor.spb.ru>

²ОАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор»
194044, Санкт-Петербург, Б.Сампсониевский пр., 24,
тел.: (812) 542-01-47, факс: (812) 542-96-59,
e-mail: info@gidropribor.ru, www.gidropribor.ru

При освоении Мирового океана возникает необходимость освещения ближней обстановки. Под освещением обстановки понимается решение комплексной задачи: «обнаружение – оценка координат – классификация» объектов. В докладе описывается конструкция и основные технические характеристики малогабаритной автоматизированной гидроакустической станции освещения ближней обстановки, разработанной ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в кооперации с ОАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор». Гидроакустическая станция состоит из приемноизлучающей антенной решетки со встроенной цифровой аппаратурой предварительной обработки сигналов, многоканального генераторного устройства, прибора цифровой обработки сигналов и пультового прибора.

При освоении Мирового океана возникает необходимость освещения ближней обстановки (ОБО). Под освещением обстановки понимается решение комплексной задачи: «обнаружение – оценка координат – классификация» объектов. ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в кооперации с ОАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор» разработали малогабаритную автоматизированную гидроакустическую станцию (ГАС), предназначенную для освещения ближней обстановки.

ГАС ОБО решает следующие задачи:

1. автоматизированное обнаружение, определение координат (дистанция, курсовой угол), сопровождение и классификация мин, надводных кораблей, подводных лодок, подводных аппаратов, их кильватерного следа и навигационных препятствий по курсу корабля;
2. обеспечение навигационной безопасности при плавании в стесненных условиях (узкости, акватории портов), вблизи берегов;
3. прослушивание эхосигналов для повышения вероятности классификации объектов.
4. автоматическую нумерацию обнаруженных объектов;
5. автоматизированный расчет прогнозируемых зон обнаружения целей и формирование рекомендаций оператору;
6. автоматизированное измерение и контроль уровня суммарных акустических помех в месте установки приемных антенн;
7. автоматизированное техническое диагностирование с точностью до типового элемента замены;
8. автоматизированный контроль антенн без отстыковки соединительных кабелей;
9. тренировку операторов;
10. архивирование первичной и вторичной информации;

11. автоматизированное ведение вахтенного и эксплуатационного журналов;
 12. обмен информацией с внешними системами.

В таблице 1 приведены основные технические характеристики ГАС ОБО.

Таблица 1. Основные технические характеристики ГАС ОБО

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Сектор обзора в горизонтальной плоскости, град - полный - одновременный	±45 10, 30, 90
2.	Сектор обзора в вертикальной плоскости, град - полный - одновременный	±20, 10, 20, 40
3.	Шкалы определения дистанции, м	500,1000,2000, 4000, 8000
4.	Время обзора полного сектора на максимальной шкале дистанции, с	12, 48, 144
5.	Дистанция обнаружения объектов с $Rэ=0,3 \dots 0,5$ м, км	1,5...2,5
6.	Дистанция обнаружения объектов с $Rэ=5 \dots 10$ м, км	3...4
7.	Дистанция обнаружения навигационных препятствий, км	8
8.	Разрешающая способность по дистанции, м	0,2
9.	Среднеквадратичная ошибка определения дистанции	1% от шкалы
10.	Разрешающая способность по курсовому углу, град	2
11.	СКО определения курсового угла, град	0,5
12.	Вид сигнала	радиоимпульс, сложный с базой 64...576
13.	Мертвая зона, м	6, 20,60
14.	Потребляемая мощность, кВт: - в импульсе - средняя	10 0,4
15.	Максимальная мощность излучения, кВт	7,5
16.	Время непрерывной работы, час	> 150
17.	Среднее время наработки на отказ, час	> 5000
18.	Среднее время восстановления неисправности, мин	10
19.	Габаритные размеры антенны (длина, высота, глубина, мм)	1800×45×600
20.	Объем аппаратной части (6-и этажные стойки «Прогресс»)	3
21.	Масса, кг	1200
22.	Охлаждение	Водяное охлаждение
23.	Условия эксплуатации: - забортной аппаратуры - бортовой аппаратуры	ГОСТ В20.39.304-98 п.2.3.5 п.2.3.1

Структура ГАС ОБО приведена на рис. 1.

В состав ГАС ОБО входят:

- приемоизлучающая цифровая антенная решетка (ЦАР);
- многоканальное генераторное устройство (МГУ);
- прибор цифровой обработки сигналов (ПЦОС);
- пультовой прибор (ПП).

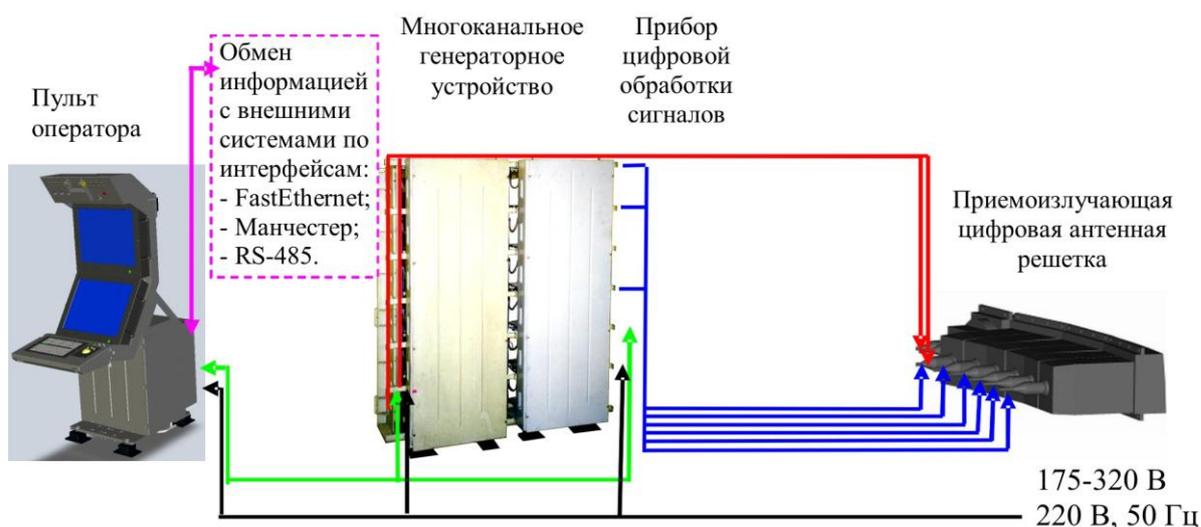


Рис. 1. Структура ГАС ОБО

Приемоизлучающая ЦАР состоит из 4-х плоских антенных подрешеток: одна – излучающая и три – приемные. Излучающая антенная подрешетка состоит из 144 (12×12) стержневых пьезокерамических преобразователей. Приемная подрешетка состоит из 240 (20×12) стержневых пьезокерамических преобразователей. В приемную антенную подрешетку встроена аппаратура предварительной обработки сигналов (АПОС), обеспечивающая усиление, фильтрацию и преобразование в 16-ти разрядный двоичный код сигналов, принятых пьезокерамическими преобразователями. Расположение приемных подрешеток – квазиконформное, т.е. они расположены под углом друг к другу с тем, чтобы вписать антенну в обводы носовой оконечности корпуса носителя. От антенны отходят 8 кабелей (2 от МГУ и 6 к ПЦОС) длиной до 35 м.

МГУ формирует в 144 каналах зондирующие сигналы с заданным оператором амплитудно-фазовым распределением, полосой частот и длительностью. МГУ также обеспечивает формирование тестовых сигналов для контроля работоспособности излучающей части ГАС ОБО, включая антенну. Прибор выполнен в виде 6-ти этажной стойки конструктива «Прогресс» с водяным охлаждением.

ПЦОС обеспечивает прием цифровых сигналов от приемных антенных подрешеток, ввод их в блок вычислителя, электропитание забортной аппаратуры, а также формирование сигналов синхронизации работы всех составных частей ГАС ОБО и формирование тестовых сигналов для проведения эпизодического контроля работоспособности приемной части ГАС ОБО, включая антенну. В ПЦОС выполняется обработка информации: формирование статического веера характеристик направленности (51 ХН в ГП × 5 ХН в ВП), согласованная фильтрация, обнаружение сигналов, трассовое сопровождение и классификация объектов, а также расчёт прогнозных зон обнаружения целей и выдача рекомендаций оператору о выборе параметров зондирующего сигнала при решении конкретной задачи (поиск малоразмерных объектов, поиск движущихся объектов, обеспечение навигационной безопасности и т.д.). Прибор выполнен в виде 6-и этажной стойки конструктива «Прогресс» с водяным охлаждением.

ПП обеспечивает включение/выключение, контроль, управление режимами работы ГАС ОБО, обмен информацией с внешними системами по интерфейсам: FastEthernet, Манчестер, RS-485, а также отображение: на нижнем мониторе интенсивности эхосигналов в секторе обзора; на верхнем экране общей обстановки и формуляров обнаруженных объектов.

На рис. 2, 3 показаны примеры отображения информации в ГАС ОЛО.

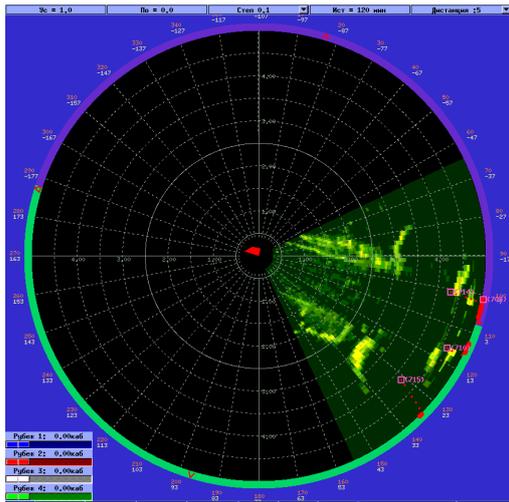


Рис. 2. Экран общей обстановки

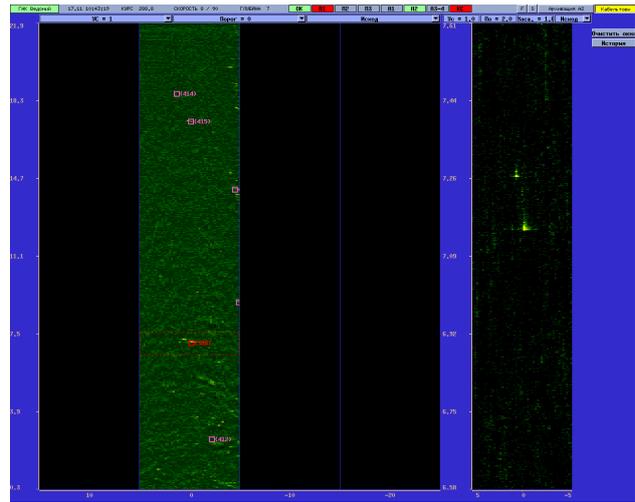


Рис. 3. Экран первичной информации

На рис. 2 показан экран общей обстановки при прохождении узкости. На этом экране в полярных координатах отображается интенсивность эхосигналов в секторе обзора. На рис. 3 показан пример отображения первичной информации при обнаружении 2-х навигационных буев. В левой части экрана отображаются оценка отношения сигнал/помеха в координатах «курсовой угол – дистанция». В правой части экрана отображается то же самое, только в увеличенном масштабе (режим «лупа»). Обзор выполнялся по заданию оператора только в одном вертикальном ярусе.

ГАС ОБО может быть доработана по требованиям Заказчика в части увеличения/уменьшения числа излучающих и приемных подрешеток с соответствующим увеличением/уменьшением габаритов аппаратной части. Срок доработок – 9 месяцев.

Поставка ГАС ОБО возможна через 15 месяцев после заключения контракта.

ЦИФРОВАЯ ГИБКАЯ ПРОТЯЖЕННАЯ БУКСИРУЕМАЯ АНТЕННА

И.Ю. Аникин¹, В.И. Зархин², М.М. Русаков¹, В.Л. Тандит¹, А.В. Тандит¹

¹ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30, тел.: (495) 6602301, факс: (495) 6605866,
e-mail: anikin@igas.ru, <http://www.elektropribor.spb.ru>

²ОАО «Концерн «Океанприбор»
197376, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 46, тел.: (812) 320 80 40, факс: (812) 320 80 52,
e-mail: mail@oceanpribor.ru, <http://www.oceanpribor.ru>

При освоении Мирового океана широко применяются гибкие протяженные буксируемые антенны. В докладе описывается конструкция и основные технические характеристики цифровой гибкой протяженной буксируемой антенны разработанной ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в кооперации с ОАО «Концерн «Океанприбор». Цифровая гибкая протяженная буксируемая антенна состоит из буксируемой линейной антенной решетки со встроенной аппаратурой предварительной обработки сигналов, токосъемного устройства и блока управления. Выходом цифровой гибкой протяженной буксируемой антенны является 18-ти разрядный цифровой код, пропорциональный давлению в каждом гидроакустическом преобразователе антенной решетки.

При освоении Мирового океана широко применяются гибкие протяженные буксируемые антенны (ГПБА). В докладе описывается конструкция и основные технические характеристики цифровой ГПБА разработанной ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в кооперации с ОАО «Концерн «Океанприбор».

На рис. 1 приведена структурная схема цифровой ГПБА, состоящая из прибора 1ПА, токосъемного устройства (ТКСУ), блока управления (прибор 15К).

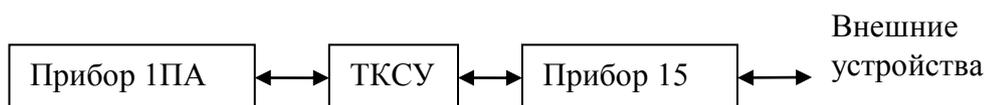


Рис. 1. Структурная схема цифровой ГПБА.

В прибор 1ПА входят: кабель-буксир длиной 250 м; гибкая буксируемая линейная эквидистантная антенная решетка длиной 92 м и диаметром 55 мм и концевое тело (стабилизатор). Общая длина прибора 1ПА составляет 343 м. Масса прибора 395 кг. Конструктивно гибкая буксируемая антенная решетка состоит из 4-х секций длиной 23 м, каждая. На рис. 2 приведена фотография фрагмента прибора 1ПА.

Антенная решетка состоит из 64-х приемников давления, расстояние между которыми 1,44 м. Для уменьшения уровня гидродинамической помехи приемники давления представляют 4 сгруппированных пьезоэлектрических преобразователя. В антенную решетку встроена аппаратура предварительной обработки сигналов (АПОС), которая обеспечивает:

- предварительное усиление, фильтрацию, преобразование в 18-ти разрядный цифровой код с частотой дискретизации 1125 Гц и уплотнение сигналов;
- передачу цифровых сигналов через кабель-буксир и ТКСУ в прибор 15;
- прием управляющих сигналов от прибора 15;

- контроль встроенной аппаратуры по командам, поступающим из прибора 15. Рабочий диапазон частот прибора 1ПА 15 Гц ÷ 500 Гц.



Рис. 2. Фотография фрагмента прибора 1ПА.

ТКСУ обеспечивает передачу сигналов от прибора 1ПА в блок управления (прибор 15).
 Масса прибора – 18 кг. Габаритные размеры прибора: 580×320×100 мм.

Прибор 15 обеспечивает:

- электропитание АПОС;
- формирование сигналов синхронизации;
- формирование команд управления АПОС прибора 1ПА;
- формирование аналоговых и цифровых тестовых сигналов для контроля цифровой ГПБА;
- обмен по интерфейсам RS-485 и FastEthernet с внешними устройствами.

Масса прибора – 75 кг. Габаритные размеры прибора: 801×450×362 мм.

В таблице 1 приведены основные технические характеристики цифровой ГПБА.

Таблица 1. Основные технические характеристики цифровой ГПБА

№	Наименование характеристики	Значение
1.	Длина гибкой протяженной буксируемой антенны, в том числе: - антенной решетки - кабель-буксира	343 м 92 м 250 м
2.	Диаметр антенны	55 мм
3.	Число приемных каналов	64
4.	Электроакустическая чувствительность гидроакустических преобразователей	180 мкВ/Па
5.	Рабочий диапазон частот	15 Гц...500 Гц
6.	Частота дискретизации сигналов	1125 Гц
7.	Разрядность оцифрованных сигналов	18
8.	Динамический диапазон в приемном канале	79 дБ
9.	Спектральная плотность шума в рабочей полосе частот, приведенная ко входу	7 нВ/Гц ^{0.5}
10.	Технологические погрешности: - точность расположения фазовых центров преобразователей - неидентичность коэффициентов передачи по амплитуде - неидентичность коэффициентов передачи по фазе	±5 мм 2 дБ 5°
11.	Обмен информацией с внешними устройствами по интерфейсам	RS-485 FastEthernet
12.	Плавучесть в морской воде	нулевая
13.	Рабочая глубина	не более 250 м
14.	Максимальная скорость буксировки	15 узл.
15.	Среднее время наработки на отказ	2300 час
16.	Максимальное число постановок-выборок	200
17.	Масса: - забортной аппаратуры - бортовой аппаратуры	395 кг 93 кг
18.	Энергопотребление	56 Вт
19.	Условия эксплуатации: - забортной аппаратуры - бортовой аппаратуры	ГОСТ В20.39.304-98 п.2.3.5 п.2.3.1

Цифровая ГПБА может быть доработана по требованиям заказчика в части увеличения длины антенной решетки до 368 м и уменьшения диаметра до 32 мм, а также формирования характеристик направленности ГПБА. Срок доработок – 12 месяцев.

Поставка цифровой ГПБА возможна через 15 месяцев после заключения контракта.

ОБЗОР АВТОНОМНЫХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ МОБИЛЬНЫХ ПРОФИЛОГРАФОВ

А.Г. Островский

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Москва, Нахимовский просп., 36, тел.: (499) 1246392, факс: (499) 1245983,
e-mail: osasha@ocean.ru

Рассматриваются автономные мобильные технические средства вертикального зондирования морской среды заякоренного типа. К этим средствам относятся зонды, периодически вытравливаемые с помощью заякоренных донных и поверхностных лебедок, а также профилографы, перемещающиеся по вертикально натянутому тросу на заякоренных буйковых станциях. В последнем случае разработано два варианта систем перемещения: системы с изменяемой плавучестью и системы, катящиеся по буйрепу с помощью электропривода. В докладе систематизированы данные о составе соответствующих технических средств и их систем связи, дана оценка эффективности применения, а также сформулированы актуальные задачи НИР.

1. Введение

Разработка автономных океанологических мобильных профилографов началась в 1970-х гг. Тогда же были запущены в мелкосерийное производство профилографы МК-I/II Cyclosonde (Van Leer et al. 1974), с помощью которых удалось получить около 30 тысяч вертикальных профилей температуры и солености воды в верхних слоях океанов, омывающих Североамериканский континент. С конца 1990-х годов океанологические профилографы, передвигающиеся вверх-вниз по тросу самостоятельно или циклирующие водную толщу с помощью лебедки, рассматриваются как перспективная компонента системы мониторинга Мирового океана. За последние 20 лет в результате выполнения НИР в разных странах мира были разработаны и испытаны в морских условиях как минимум 19 образцов, некоторые из которых стали производиться серийно. В январе 2011 г. Вудс Холльский океанографический институт (WHOI) при поддержке Национального научного фонда США объявил новый конкурс. В результате этого проекта должны быть разработаны 2 типа профилографов (прибрежный и глубоководный), которые перемещаются по тросу (Coastal and Global Wire Following Profilers). Эти разработки нацелены на решение задач крупнейшей американской программы Инициатива по океанским обсерваториям (Ocean Observatories Initiative).

В основе проектов по океанологическим профилографам лежит необходимость накапливать длительные временные ряды вертикальных распределений параметров океана в фиксированных географических точках в ключевых для мониторинга акваториях. Основное назначение профилографов состоит в регулярном получении вертикальных тонкоструктурных профилей различных характеристик морской среды с временным интервалом достаточным, чтобы разрешить энергоактивные внутрисуточные колебания на протяжении нескольких сезонов или даже лет. Профилографы необходимы также для диагностирования эпизодических внутриводных аномалий с временем жизни в несколько часов. Важно, что с помощью профилографов соответствующие измерения выполняются одним набором измерительных датчиков во всем столбе воды от приповерхностного слоя до дна, что позволяет получить однородные данные с одинаковой точностью.

Для изучения экосистем и их реакции на внешние, в том числе на климатические воздействия, необходимо измерять вертикальные профили физических, химических и биологических характеристик с разрешением лучше 1 м, а профилирование нужно проводить с интервалом порядка 1 часа.

2. Типы океанологических мобильных профилографов

Все мобильные профилографы, разработанные с начала 1990-х гг., можно классифицировать по четырем главным особенностям: способу постановки, энергетике, способу перемещения и системе связи (Табл. 1).

2.1. Лебедки, зондирующие с поверхности моря

В варианте постановки с поверхности моря профилографы представляют собой систему, состоящую из автоматизированной лебедки с кабель-тросом, на конце которого имеется океанологический измерительный комплекс. Лебедка ставится на буй, который как правило снабжается системой мобильной связи или УКВ радиомодемом (см. например, Buoy Profiler 601/701, серийно производимый компанией Idronaut S.r.l., рис. 1).

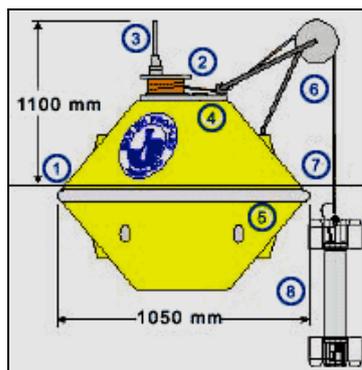


Рис. 1. Профилограф Buoy Profiler 601: 1 – буй из стеклопластика, внутри которого размещены: контроллер, модем мобильной телефонной связи или УКВ радио модем, блок батарей; 2 – лебедка с блоком и с барабаном, установленным горизонтально; 3 – радиоантенна в морском исполнении; 4 – разъемы; 5 – рымы; 6 – ролик для кабеля; 7 – полиуретановый коаксиальный армированный кабель; 8 – подводный комплекс измерительных датчиков на базе зонда солености, температуры и давления (СТД) Ocean Seven 316 (Idronaut S.r.l, Италия)

Применение автоматических зондирований с помощью лебедки на поверхностном бую имеет ограничения по штормовым условиям акватории. Такие системы с успехом могут применяться для мультидисциплинарных исследований в прибрежной зоне (см. например, Lips et al. 2011). Глубина зондирований ограничена несколькими десятками метров, а в период между зондированиями комплекс измерительных датчиков на кабель-тросе целесообразно опускать ниже эвфотической зоны (Dunne et al. 2002), чтобы уменьшить эффекты биообрастания. Преимущества и недостатки применения профилографов на поверхностных буюх сведены в Таблицу 2.

2.2. Донные профилографы с лебедками

Донные станции пока редко оснащаются донными лебедками с профилирующими носителями измерительной аппаратуры (часто используются акустические доплеровские профилографы течений). Донные системы обладают неоспоримым преимуществом: они позволяют производить зондирования от дна до границы раздела вода-воздух. Данные могут передаваться как по донному кабелю, так и по радиоканалу, когда носитель измерительной аппаратуры с терминалом связи поднимается к поверхности моря. Хорошие результаты дало применение электромеханического профилографа на мелководье (C. von Alt et al. 1992, Forrester et al. 1997, C. von Alt et al. 1997).

Есть целый ряд факторов, которые необходимо учитывать при выборе донной лебедки, включая глубину места в районе работ, гидрометеорологические условия, прежде всего максимальную и среднюю скорость течений, скорость перемещения и плавучесть полезной нагрузки носителя, источник электропитания и т.д. Донные лебедки компании InterOcean systems рассчитаны на длину кабель-троса не более 300 м. Скорость вытравливания и наматывания ими кабеля составляет 5-10 м/мин.

Подводное положение измерительных датчиков должно определяться с помощью датчика давления, входящего в состав контрольно-измерительной аппаратуры профилирующей системы. Это позволяет точно позиционировать профилирующий носитель относительно поверхности моря без учета наклона кабель-троса под действием морского течения. При достижении атмосферного давления контроллер дает команду на остановку двигателя лебедки.

Таблица 1. Основные мобильные океанологические профилографы разработанные с 1990-х гг.

Название профилографа	Развертывание		Электропитание		Двигатель			Связь				Разработчик					
	Заякоренный	Поверхностный буй	Приотпленный заякоренный буй	Донная	Кабельное	Батарея / Аккумулятор	Возобновляемые источники энергии	Лебедка		Система изменения плавучести			Радиосвязь		Подводная связь		
								На профилирующем носителе	Электромотор с приводным роликом на носителе	Гидравлическая	Механическая		Кабельная	Мобильная	Спутниковая	УКВ	Индуктивная
Oceanic Remote Chemical/ Optical Analyzer (ORCA)	+					+	+	+					+				Университет штата Вашингтон (США)
Buoy profiler 601/701	+					+		+					+	○	○		Idronaut S.r.l. (Италия)
Automatic profiling buoy (APB) 505	+					+		+					+				SAIV A/S,
LEO-15*					+	+		+					+				WHOI, Университет Рутгерса (США)
Vertical Profiling System (VPS) VPS25, VPS100, VPS200, VPS300					+	+		+					+				InterOcean systems, inc. (США)
Self-Up/Down Winch-type Buoy					+	+			+				+				Nichiyu Giken Kogyo Co Ltd. (Япония)
X10									+								Университет штата Орегон (США)
Miniaturized Autonomous Moored Profiler (AMP) AMP-WQ50, AMP-ES100					+	+		+					+		+		WET Labs, Inc. (США)
SeaCycler			+			+		+					+	+	+		Бедфордский океаногр. инст. (Канада)
SeaHorse	+					+	+						+			+	ODIM Brooke Ocean (Канада)
SeaTramp PP2			+			+				+			○	○	○		Ocean Origo AB (Швеция)
McLane Moored Profiler (MMP)			+			+					+					+	McLane Co. (США)
Циклозонд			+			+							+				АО ИО РАН (Россия)
Аквазонд			+			+							+				ИО РАН (Россия)
Аквалог			+			+							+	+	○	+	ИО РАН (Россия)
Externally Powered/ Compressibility Compensated (EP/CC) -Yoyo			+			+							+				Институт Альфреда Вегенера (Германия)
Polar Ocean Profiling System (POPS)		+				+				+				+			МЕТОСЕАН (Канада)
Ice-Tethered Profiler (ITP)		+				+				+				+			WHOI (США)

Таблица 2. Особенности автоматических систем зондирований с морской поверхности

Описание	Преимущества/Требования	Недостатки
Способ постановки с заякоренного поверхностного буя	Легко сборная модель, низкие требования к герметичности. Применяемый тороидальный буй имеет большую хорошо видимую поверхность и удобную рабочую площадку, позволяет безопасно опускать измерительный комплекс по центру тора. Тороидальный буй обладает живучестью в океанских условиях.	Подвергается воздействию ветра и волн, заселяется морскими видами животных и растений, имеет высокие риски столкновений с плавающими объектами, затравливания и вандализма. Буй из стеклопластика может лопнуть при столкновении с плавающим объектом. Размеры и вес буя серьезно затрудняют постановку с маломерного плавсредства.
Заякоренная система на трех якорях	Позволяет зафиксировать положение буя, ориентацию на солнце, позволяет избежать запутывания подводного кабеля и тросов якорных линий.	Сложно ставить особенно на глубокой воде.
Профилирование с помощью лебедки	Широкий выбор габаритов и веса комплекса измерительных датчиков, возможность профилирования с фиксированной скоростью, выдерживание точной глубины, технологическая простота.	Высокое потребление энергии. Ограничение по максимальной глубине профилирования (~100 м).
Лебедка с тросоукладчиком	Технологически простая и прочная. Короткое направляющее устройство без блока позволяет укрыть лебедку и кабель в небольшом корпусе от погодных явлений и вандалов, а также обеспечивает доступ к комплексу измерительных датчиков.	Ширина барабана для намотки кабеля ограничена, не больше 1/6-ой длины направляющего устройства.
Панель солнечной батареи	Обеспечивает электропитание системы до окончания срока службы аккумуляторов.	Мощность в зимнее время существенно ограничена, требует ориентации батарей на юг, увеличивает сопротивление ветру.
Контроллер	Должен обеспечивать контроль технических и программных средств при подключении нескольких устройств. Требуется постоянная память большого объема.	Программирование и отладка занимают много времени разработчиков.
Мобильная телефонная связь / Радио УКВ связь	Позволяет скачивать данные, менять параметры и расписание измерений и управлять профилографом дистанционно на больших расстояниях. УКВ связь на радиолюбительских частотах не лицензируется.	Ограничена по дальности. Плохое качество связи приводит к частому повторению запросов на передачу данных. Мобильная телефонная связь – дорогостоящая.

Основное препятствие для применения донных лебедок состоит в том, что сильное течение может притопить профилирующий носитель. Для борьбы с этим эффектом увеличивают плавучесть профилографа (например, до 150 кг в профилографах InterOcean systems) и повышают мощность лебедки, что приводит к необходимости подачи

электропитания с берега. Проблемы могут возникать и при плохой укладке троса из-за неравномерности его натяжения под действием поверхностных волн.

Интересные разработки профилирующего от дна носителя измерительной аппаратуры, оснащенного лебедкой имеются у Университета штата Орегон (McLean, Barnard, 2005), а также у компаний Nichiyu Giken Kogyo Co Ltd. (Япония) и WET Labs Inc., входящей в группу RDI Teledyne Group (США).

Разработка Autonomous Moored Profiler (AMP) компании WET Labs (рис. 2) была нацелена на создание гибкой системы, позволяющей по требованию заказчика перестраивать функции в части выбора датчиков, управления процессом измерений и передачи данных.



Рис. 2. Фото профилирующего носителя AMP со снятой боковой панелью и со снятым обтекателем блока лебедки и батарей в нижней части прибора

Как и донная профилирующая лебедка, профилограф AMP предназначен для зондирований от дна до поверхности раздела вода-воздух. Особенностью конструкции профилографа является наличие лебедки на самом профилирующем носителе. На барабане лебедки намотан трос, нижний конец которого закреплен на якорю. Наматывая трос на барабан лебедки, профилограф опускается ко дну, а разматывая, – поднимается к поверхности.

Вертикальное крыло обеспечивает ориентацию профилографа в течении. Блоки плавучести расположены в верхней 1/3 части профилирующего носителя. Центры масс и плавучести разнесены по вертикали, что обеспечивает момент для удержания изделия в вертикальном положении.

Предусмотрены два режима работы – постоянная или переменная скорость вращения мотора лебедки. В первом случае, размотка и намотка троса на барабан происходят с постоянной скоростью. Этот режим хорошо работает в спокойной воде при отсутствии поверхностных волн. При включении второго режима, скорость вращения мотора меняется так, чтобы поддерживать постоянное натяжение троса. Это важно когда под воздействием морского волнения возникают ускорения носителя.

Система телеметрии работает только тогда, когда антенна связи находится в надводном положении. Она включается, когда носитель достигает, так называемой, «радио глубины». Система телеметрии может включать УКВ радиопередатчик, CDMA терминал мобильной связи и аппаратуру связи WiFi.

Профилирующие носители измерительной аппаратуры, оснащенные лебедками, имеют те же серьезные ограничения, что и системы с донными лебедками:

- небольшой диапазон профилирования (примерно 100 м),
- большие энергозатраты на намотку троса при значительной положительной плавучести носителя.

Кроме того, в профилографе AMP океанологические датчики располагаются в верхней части носителя, чтобы обеспечить измерения в невозмущенной среде, и при всплытии для передачи данных, некоторые датчики возвышаются над поверхностью воды обсыхают.

2.3. Профилографы, перемещающиеся по буйрепу

Профилографы, устанавливаемые на заякоренных буйковых системах, в которых буйреп служит ходовым тросом, имеют преимущество при работе на глубинах, превышающих 100 м. Из производимых ныне к таким приборам относятся SeaHorse (Hamilton et al. 1999), SeaTramp PP2 (Arneborg et al. 2004), McLane Moored Profiler MMP

(Doherty et al. 1999) и Аквалог (Островский и др. 2009, Ostrovskii et al. 2010, Ostrovskii and Zatsepin 2011). Они позволяют оптимизировать процесс измерений при глубоководных постановках 1000 м и более. Вместо нескольких наборов приборов на стандартных гидрологических горизонтах используется один комплект измерительных датчиков, что во много раз уменьшает затраты на проведение измерений. Такая система за одну постановку может проводить непрерывные измерения в одной точке в течении сезона и более, в том числе в зимнее время подо льдом, что в данном случае делает ее незаменимой.

На рис. 3 показан профилограф Аквалог, укомплектованный акустическим доплеровским измерителем течений Aquadop (Nortek AS, Норвегия) и СТД зондом FSI Teledyne Excell (Falmouth Scientific Co., США) и подводным индуктивным модемом производства Sea Bird Electronics Inc. (США). С этим носителем также интегрированы СТД зонды SBE19plus, SBE49, SBE52MP (все Sea Bird Electronics Inc.), Citadel (RDI Teledyne Group), XR620 (RBR Co., Канада), акустический доплеровский профилограф течений RDI Doppler Volume Sampler (RDI Teledyne Group). Причем зонды СТД могут доукомплектовываться оптическими датчиками флуоресценции и мутности компаний Wet Lab или Sea Point (США). По желанию заказчика профилограф комплектуется датчиком растворенного кислорода AANDERAA 4330F (AANDERAA AS, Норвегия) и измерителем обратного акустического рассеяния AQUAScat 1000 (Aquatech Ltd., Великобритания). Большие возможности комплектования измерительной аппаратурой делают систему гибкой, адаптируемой под различные задачи.



Рис. 3. Профилограф Аквалог

В части передачи данных и телеметрической информации профилограф Аквалог наряду может также комплектоваться цифровым акустическим модемом Benthos ATM 885 (RDI Teledyne Group). С профилографом поставляется буй с индуктивным модемом или акустическим модемом и техническими средствами мобильной связи GSM/GPRS, спутниковой связи ARGOS или IRIDIUM, а также УКВ радиосвязи по выбору заказчика. Профилограф Аквалог по существу является океанологической обсерваторией, позволяющей проводить мониторинг в режиме реального времени

Наряду с профилографами MMP и Аквалог, приводимыми в движение с помощью электропривода, были разработаны профилографы Externally Powered/ Compressibility Compensated (EP/CC) – Yoyo (Budéus 2009) и SeaTramp PP2, которые могут изменять собственную плавучесть.

Эти два типа приборов в сравнении друг с другом имеют преимущества и недостатки, однако, в обоих случаях главных ограничений два:

- невозможность профилирования до поверхности океана и передачи данных непосредственно с профилографа на берег,
- лимит на общую протяженность хода, определяемый емкостью собственных блоков питания приборов, как в SeaTramp PP2, MMP и Аквалог, или запасом сбрасываемого балласта, как в EP/CC – Yoyo.

Чтобы снять второе ограничение, нужно использовать возобновляемый источник энергии. Пока была осуществлена только одна такая разработка SeaHorse, в которой утилизируется энергия поверхностных волн. Но этот прибор имеет серьезные ограничения на условия эксплуатации в штормовую погоду.

Особняком в ряду профилографов, перемещающихся по буйрепу, стоят два прибора Polar Ocean Profiling System – POPS (METOCLEAN, Канада) и Ice-Tethered Profiler – ИТР (Krishfield et al. 2008) предназначенные для перемещения по тросу, спущенному с дрейфующих льдин или припайного льда. В первом случае прибор работает за счет изменения собственной плавучести, во втором – перемещается с помощью электропривода. Эти два прибора также имеют существенные ограничения на диапазон глубин (~10-800 м) и автономность работы.

3. Заключение

Представленные в обзоре результаты разработок, позволяют сделать вывод о целесообразности комбинирования двух типов профилографов для получения данных во всем столбе воды в глубоководных акваториях и для передачи этих данных в береговой центр, см. например (Howe et al. 2007). Для профилирования в столбе воды глубже 20-50 м наилучшим образом подходят профилографы, перемещающиеся по тросу глубоководной буйковой станции, а для циклирования в верхнем 20-50 метровом слое моря можно использовать лебедку, установленную на притопленной плавучести. Такая система может состоять из одной или из двух буйковых станций, соединенных линиями подводной связи.

Литература

1. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Деревнин В.А., Низов С.С., Поярков С.Г., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Заякоренная автоматическая измерительная система «Аквазонд» для вертикального профилирования морской среды // *Океанология*. 2008. Т. 48, № 2. С.1-10.
2. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Иванов В.Н., Низов С.С., Соловьев В.А., Тимашкевич Г.К., Цибульский А.Л., Швоев Д.А., Кебкэл К.Г. Заякоренная профилирующая океанская обсерватория // *Подводные исследования и робототехника*. 2009. №2/8.
3. Arneborg L., Erlandsson C.P., Liljebladh B., Stigebrandt A. The rate of inflow and mixing during deep-water renewal in a sill fjord // *Limnol. Oceanogr.*, 2004. №3. P.768–777.
4. Budéus G.Th. Autonomous Daily CTD Profiles Between 3,700 Meters and the Ocean Surface // *Sea Technology*, 2009. V.50, №10. P.45-8.
5. Doherty, K.W., Frye D.E., Liberatore S.P., Toole J.M. A moored profiling instrument // *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1999. V. 16. P.1816–1829.
6. Dunne J.P., Devol A.H., and Emerson S. The Oceanic Remote Chemical/Optical Analyzer (ORCA) – An Autonomous Moored Profiler // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. V.19, №10. P.1709-1721.
7. Echert D.C., Morison J.H., White G.B., Geller E.W. The autonomous ocean profiler: A current-driven oceanographic sensor platform // *J. Oceanic Eng.*, 1989. 14, P.195–202.
8. Forrester N.C., Stokey R.P., von Alt C., Allen B.G., Goldsborough R.G., Purcell M.J., Austin T.C. The LEO-15 Long-term Ecosystem Observatory: Design and installation. // *Proc. Oceans '97*, 1997. Halifax, NS, Canada, MTS/IEEE. V. 2. P.1082-1088.
9. Hamilton J., Fowler G., and Beanlands B. Long-term monitoring with a moored wave-powered profiler // *Sea Technol.*, 1999. V.40. P. 68-69.
10. Howe B.M., McGinnis T., and Boyd M.L. Sensor Network Infrastructure: Moorings, Mobile Platforms, and Integrated Acoustics // *Symposium on Underwater Technology 2007 and Proceedings, Workshop on Scientific Use of Submarine Cables & Related Technologies 2007*, University of Tokyo, 17-20 April 2007.

11. Krishfield R., Tool J., Proshutinsky A., Timmermans M.-L. Automated Ice-Tethered Profilers for seawater observations under pack ice in all seasons // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008. V. 25, №11. P. 2091-2105. DOI: 10.1175/2008JTECHO587.1
12. Lips U., Lips I., Liblik T., Kikas V., Altoja K., Buhhalko N., Rünk N. Vertical dynamics of summer phytoplankton in a stratified estuary (Gulf of Finland, Baltic Sea) // *Ocean Dynamics*, 2011. V. 61, №7. P. 903–915. DOI 10.1007/s10236-011-0421-8
13. McLean S., Barnard A. Next generation ocean observing systems – Enabling new science // *Ocean News and Technology*. 2005. V. 11, №2. P. 46-49.
14. Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G., Shvoev D.A., Soloviev V.A. Underwater anchored profiler Aqalog for ocean environmental monitoring // *Advances in Environmental Research*, 2010. V. 4. P. 201-218.
15. Ostrovskii A.G., Zatsepin A.G. Short-term hydrophysical and biological variability over the northeastern Black Sea continental slope as inferred from multiparametric tethered profiler surveys // *Ocean Dynamics*. 2011. V. 61, №6. P. 797-806.
16. Van Leer J., Duing W., Erath R., Kenelly E., Speidel A. The Cyclosonde: An unattended vertical profiler for scalar and vector quantities in the upper ocean // *Deep-Sea Research*. V. 21. P. 385-400.
17. Von Alt C., Grassle J.F. LEO-15 – an unmanned long-term environmental observatory // *MTS/IEEE OCEANS '92 Proceedings*, 1992. P. 849-854.
18. Von Alt C., De Luca M.P., Glen S.M., Grassle J. F., and Haldvogel D. B. LEO-15: Monitoring and managing coastal resources // *Sea Technol.* 1997. 38. P. 10–16.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МУЛЬТИДИЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗАЯКОРЕННОГО ПРОФИЛОГРАФА АКВАЛОГ

**А.Г. Островский, А.Г. Зацепин, В.А. Соловьев, А.Л. Цибульский, Д.А. Швоев,
С.А. Щука**

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Москва, Нахимовский просп., 36, тел.: (499) 1246392, факс: (499) 1245983
e-mail: osasha@ocean.ru

В.Б. Лобанов

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

В.Т. Пака

Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Калининград

В докладе обобщен опыт применения заякоренного автоматизированного профилирующего зонда Аквалог для мультидисциплинарных научных исследований в Балтийском, Черном и Японском морях в 2010-2011 гг.

1. Область применения зонда-профилографа Аквалог

Современные заякоренные автоматизированные зонды-профилографы призваны помочь ответить на вопрос о том, как под воздействием меняющегося климата трансформируются физические и химические характеристики морской среды, динамика течений, состав морской биоты, оказывая влияние как на кросс-фронтальный обмен веществом в шельфово-склоновой зоне и в открытом море, так и на распределение и потоки взвешенного и растворенного вещества вблизи границ раздела океан-атмосфера, пелагиаль-мезопелагиаль (~200 м), мезопелагиаль-батиаль (~1000 м).

Потоки и состав живого и неживого вещества в верхнем 1000 метровом слое океана контролируются:

- динамическими факторами, в первую очередь горизонтальной адвекцией, турбулентностью и вертикальным перемешиванием,
- биохимическими факторами, такими как миграция, первичная продукция и дыхание организмов.

И те и другие факторы нестационарны, причем характер зависимости обменных процессов от времени меняется с глубиной.

Для того, чтобы понять как на протяжении десятилетий морские экосистемы приспосабливаются к длительным трендам климата и реагируют на крупномасштабные явления, такие как Эль-Ниньо и Североатлантическое колебание, нужны измерения на малых временных масштабах от нескольких часов до нескольких суток. Морские экосистемы постоянно находятся под влиянием динамических процессов с периодами близкими к суточному, инерционному и полусуточному, амплитуды колебаний которых весьма велики. Воздействия нерегулярных событий, таких как апвеллинги и каскадинги на экосистемы также могут быть очень значительными, и их надо контролировать, но сами эти события обычно происходят редко, несколько раз в год. Оценить влияние короткопериодных, иногда хаотичных динамических процессов на морскую биоту возможно только на основе постоянных измерений.

Вертикальное профилирование, в отличие от измерений на фиксированных горизонтах, должно быть адекватным тонкоструктурным неоднородностям морской среды, чтобы получить вертикальный «срез» термохалинных линз и интрузий, скоплений планктона и

звукорассеивающих слоев с разрешением не хуже 1 м. Тонкие протяженные по горизонтали скопления организмов характерны для слоистой организации морских экосистем. Тонкие звукорассеивающие слои часто оказываются проявлением скоплений мезозoopланктона и микронектона на вертикальных градиентах свойств морской среды и границах раздела водных масс. Физические процессы, такие как внутренние волны, интрузии, перемешивание и горизонтальная адвекция приводят к перераспределению организмов, в результате чего тонкие слои могут быстро исчезать за несколько часов.

Таким образом, для изучения экосистем и их реакции на внешние, в том числе на климатические воздействия, необходимо измерять вертикальные профили физических, химических и биологических характеристик с разрешением лучше 1 м, а профилирование нужно проводить с интервалом порядка 1 часа.

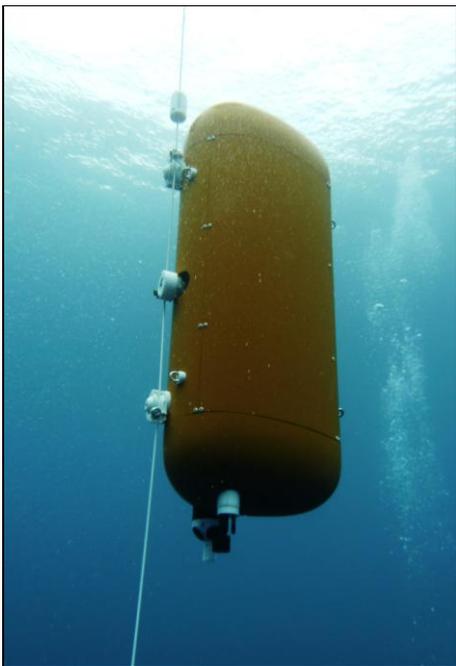


Рис. 1. Зонд-профилограф Аквалог

Зонд-профилограф Аквалог (рис. 1) представляет собой носитель, укомплектованный океанологическими измерительными датчиками и системой оперативной связи и управления (Островский и др., 2009). Носитель автоматически со скоростью около 0,2 м/с передвигается по вертикально натянутому тросу на притопленной буйковой станции. Зонд Аквалог может выполнять циклы спуск/подъем в условиях довольно сильных морских течений, скорость в которых достигает 0,8 м/с, когда буйреп наклонен на 10-15°. Автономный источник электропитания прибора обеспечивает ежедневные вертикальные зондирования столба воды от приповерхностного слоя до горизонта 1000 м на протяжении 6 месяцев в обычных условиях при умеренной скорости течений до 0,3 м/с.

2. Натурные эксперименты

2.1. Японское море

Зимний эксперимент был проведен в Японском море с 27 февраля по 14 марта 2010 г. Целью этой эксперимента стало исследование экологического состояния и механизмов самоочищения залива Петра Великого Японского моря, в особенности изучение физических механизмов вентиляции вод за счет водообмена залива с глубокой частью моря. В аномальных климатических условиях зимы 2010 г., когда наблюдались наиболее низкие за последнее десятилетие температуры воздуха и в ранние сроки прошло становление льда, ожидалось повторение редких явлений интенсивной склоновой конвекции и вентиляции донных вод Японского моря. Для регистрации событий выноса холодных вод с шельфа залива Петра Великого был задействован автоматический заякоренный профилограф Аквалог с комплектом самых современных гидрофизических датчиков: измерителя электропроводности, температуры и давления FSI CTD Excel и доплеровского измерителя скорости течения и обратного рассеяния звука Nortek Aquadopp.

Профилограф Аквалог успешно выполнил свою задачу, проведя детальные измерения 352 вертикальных профилей скорости течения, температуры и солености воды почти с разрешением порядка нескольких десятков сантиметров от приповерхностного слоя, от

горизонта 24 м, до дна моря, до глубины 103 м, за 16 дней наблюдений. С помощью профилографа Аквалог собраны уникальные данные о водообмене залива Петра Великого с глубокой частью Японского моря. Частые зондирования позволили зарегистрировать явления выноса холодных вод и получить новые экспериментальные данные о вертикальной плотностной структуре и скорости вентиляции вод залива Петра Великого. В частности, 7 марта 2010 г. было зарегистрировано сильное холодное (до $-1,2^{\circ}\text{C}$) юго-западное течение в придонном 40 м слое (рис. 2).

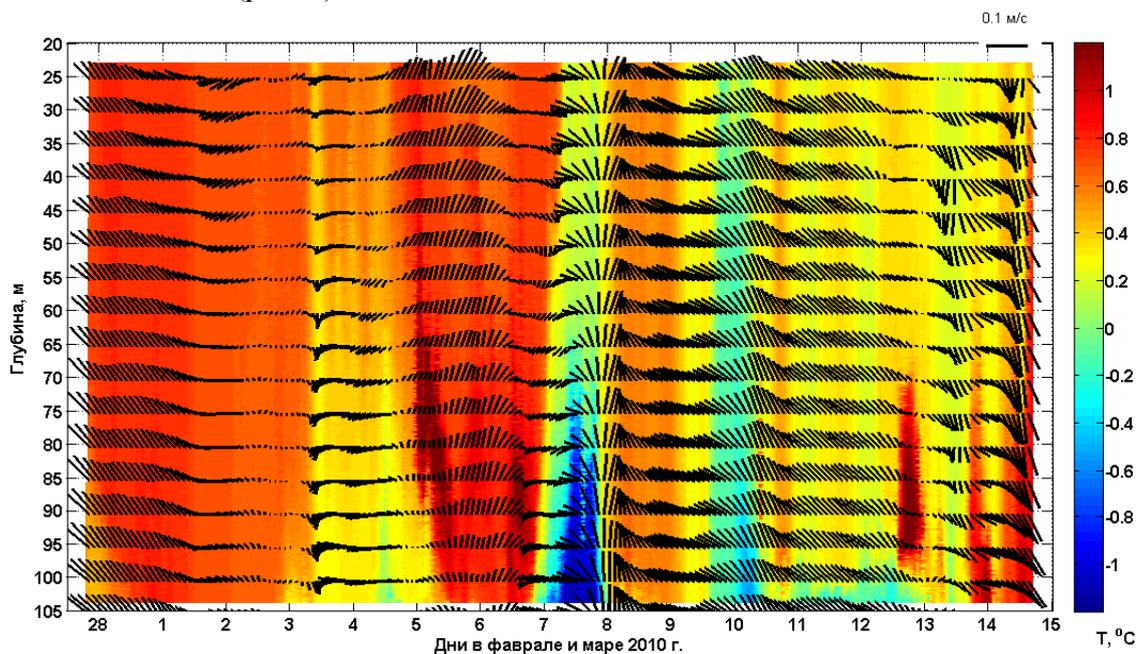


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воды по данным измерений профилографом Аквалог в марте 2010 г. в точке с координатами $42^{\circ}24,541$ с.ш. $132^{\circ}00,07$ в.д. Стрелками показаны векторы течений.

2.2. Балтийское море

Летом 2010 г. исследования вертикального распределения параметров среды Балтийского моря осуществлялись на буйковых станциях с помощью профилографа Аквалог, оснащенного CTD-зондом Idronaut 316 с датчиком рН и с быстрым датчиком растворенного кислорода. Система автоматически 1 раз в 2 часа профилировала водную толщу между горизонтами 25 м и 102 м. С 8 по 26 июня было выполнено 217 циклов профилирования.

На рис. 3, где изображена временная развертка вертикального распределения температуры, видны короткопериодные (12-16 часов) колебания нижней границы термоклина (горизонты 25-45 м), размах которых в среднем составляет несколько метров, но иногда возрастает до 10 м и более. Эти колебания имеют временной масштаб близкий к инерционному. Значительное усиление размаха этих квази-инерционных колебаний в период с 11 по 16 июня обусловлено, по-видимому, штормовыми воздействиями. Интересно, что в этот период наблюдалось также увеличение средней температуры на горизонтах 25-35 м в нижней части термоклина. Это, скорее всего, означает, что штормовые воздействия привели не только к возбуждению колебательных движений в области термоклина, но и усилили в нем вертикальный турбулентный обмен, осуществляющий перенос тепла и кислорода сверху вниз.

В нижней части холодного промежуточного слоя (ХПС), верхней части перманентного пикноклина (горизонты 70-85 м), наблюдались интрузии более холодной воды в периоды с 9 по 12 июня и с 21 по 25 июня (рис. 3). В эти же сроки можно было проследить события вентиляции верхней части пикноклина по данным о вертикальном распределении

растворенного кислорода. В первом случае по данным на начало 10 июня насыщение вод кислородом увеличилось до 60% по сравнению с фоновыми значениями в 45%, зарегистрированными 8 июня.

Особый интерес представляют события понижения содержания O_2 после поступления холодных и свежих вод в слое 75-85 м. Примерно через 2 суток после события вентиляции вод содержание O_2 в этих водах опускалось до значений ниже фоновых. Так, в первом случае аномально низкие для слоя 75-85 м значения насыщения кислородом наблюдались 12-15 июня, причем минимум 30% был достигнут 13 июня.

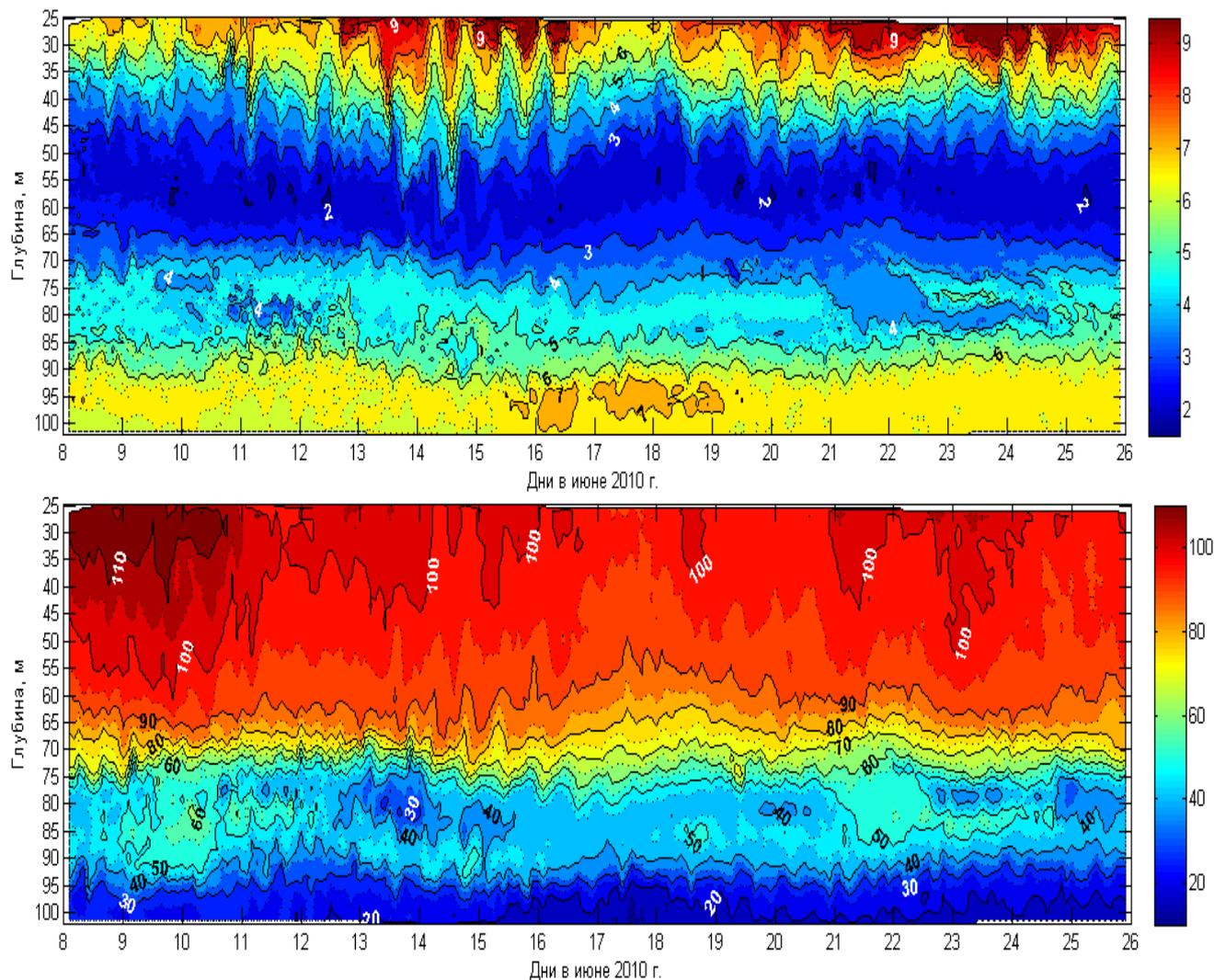


Рис. 3. Временная изменчивость вертикальных распределений температуры воды и содержания кислорода в воде по данным измерений на заякоренной буйковой станции Аквалог в Гданьской впадине Балтийского моря в июне 2010 г.: вверху – температура, °С; внизу – концентрация растворенного O_2 , %

Заток холодной насыщенной кислородом (60% насыщения) воды на глубины до 80 м отражает вентиляцию халоклина нижними водами верхнего перемешанного слоя. Локальное падение концентрации растворенного O_2 в следующие 2-3 дня до 40-50% и далее до 30% насыщения можно объяснить комбинацией физических и химических факторов. Столь быстрое падение содержания O_2 едва ли соизмеримо с затратами на окисление. Это событие и относительно высокое содержание O_2 в подстилающем слое (7-10 % насыщения, при норме ~ 0-2%) можно связать с горизонтальной адвекцией обедненных кислородом вод.

После достижения минимума растворенного кислорода наступает постепенная релаксация – подъем содержания кислорода до фоновых значений.

В более глубоком слое 90-100 м в Гданьской котловине с 15 по 19 июня отмечена интрузия теплых вод с минимальным для всего периода наблюдений насыщением кислородом – менее 15% по данным на 17 июня. Такие интрузии характеризуются замкнутыми изолиниями и, скорее всего, также имеют адвективную природу.

2.3. Черное море

С помощью профилографа Аквалог были получены интересные косвенные данные о динамике планктона и колебаниях границы сероводородной зоны в водах верхней части континентального склона в районе Геленджикской бухты 5-14 октября 2010 г. (рис. 4). Для выполнения этих экспериментов профилограф был оснащен зондом FSI CTD Excel, акустическим доплеровским измерителем Nortek Aquadopp, работающим на частоте 2 МГц, и безмембранным датчиком кислорода (Стунжас 2000). Система ежедневно профилировала водную толщу между горизонтами 20 м и 250 м.

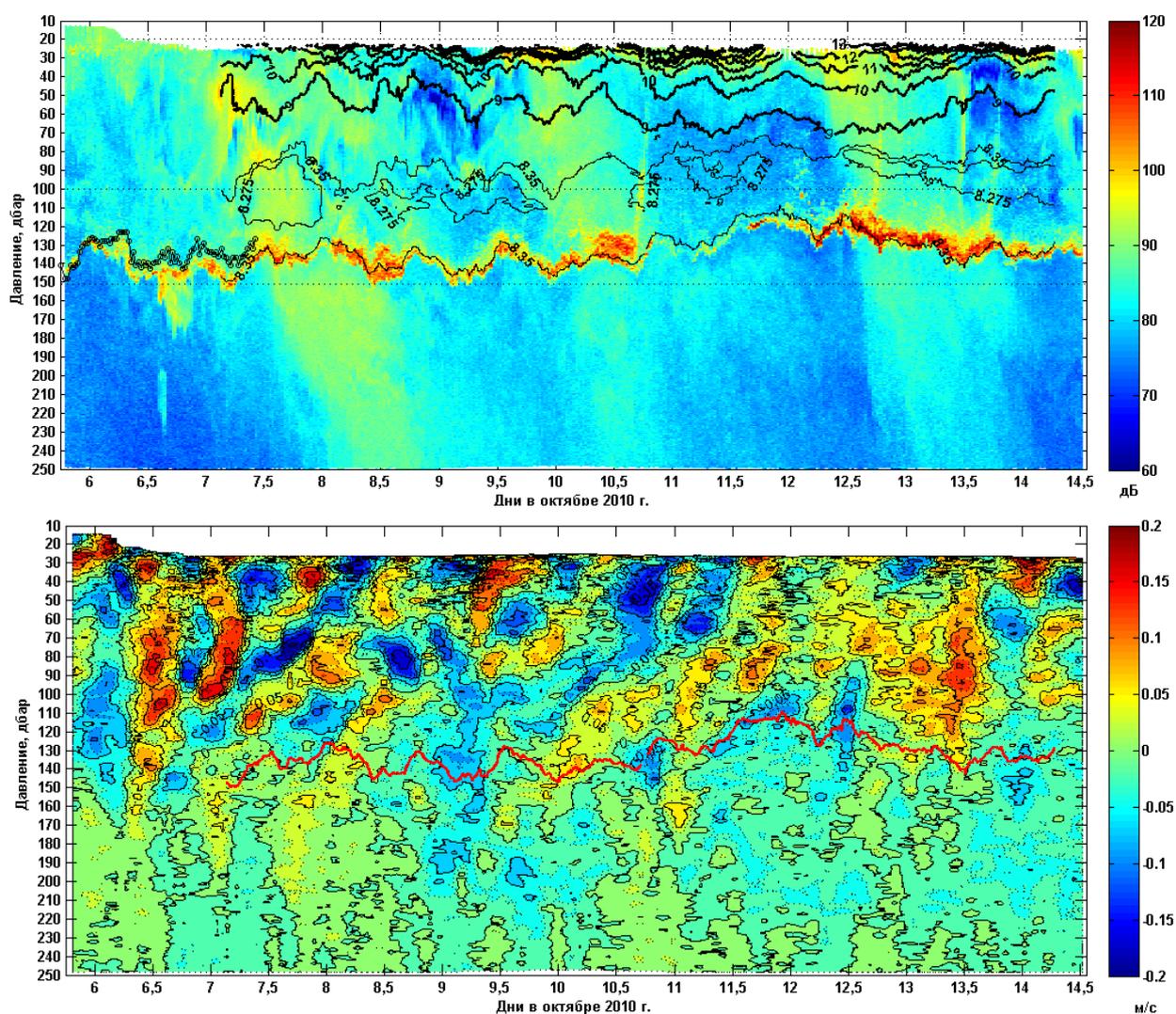


Рис. 4. Результаты измерений с помощью зонда-профилографа Аквалог в районе Геленджикской бухты Черного моря в октябре 2010 г. Вверху – временная развертка вертикального распределения интенсивности рассеяния звука. Черные сплошные линии – изотермы. В левой части рисунка кружками обозначено положение границы аэробных вод по данным безмембранного датчика O_2 с 18:00 05.10.10 по 11:00 07.10.10. Внизу – временная развертка вертикального распределения аномалий (отклонений от 3-х сут. скользящего среднего) скорости течения параллельной кромке шельфа. Красная линия – изотерма $8,35^{\circ}C$

Данные измерений свидетельствуют о том, что интенсивность рассеяния звука была наибольшей в тонком слое, колебавшемся в пределах 110-150 м. Этот слой был обусловлен скоплением мезозоопланктона, находящемся в состоянии диапаузы. Колебания этого слоя хорошо коррелировали с глубиной границы аэробной зоны по данным безмембранного датчика кислорода.

На рис. 4 представлено распределение компоненты скорости течения, направленной вдоль кромки шельфа, и отображено положение изотермы $8,35^{\circ}\text{C}$ под ХПС и над анаэробном слое, которая служит индикатором слоя диапаузы мезозоопланктона.

По данным измерений течений 6 октября в районе буйковой станции проходил субмезомасштабный вихрь, захвативший верхний слой толщиной до 170 м. Орбитальная скорость движения в вихре достигала $0,25$ м/с на горизонте 30 м и падала до значений $0,05$ м/с на горизонте 130 м. Возможно, движение вод в нижней части вихря привело к кратковременному заглублению диапазирующего мезозоопланктона на 20-30 м (оранжевая вертикальная полоска, соответствующая повышенному рассеянию звука на частоте 2 МГц на горизонтах 145-160 м примерно в 13:00 6 октября на рис. 4). При этом прогиб изооксиген не наблюдался. Это означало, что мезозоопланктон был привнесен в пограничный слой с минимальным содержанием O_2 , а возможно даже глубже, где произошла его гибель, что отразилось в виде пятна в распределении рассеяния звука на горизонтах 150-175 м в срок примерно с 13:00 по 17:00 6 октября.

Из рис. 4 следует, что под ядром ХПС в слое повышенных вертикальных градиентов солености зачастую наблюдались низкочастотные волновые возмущения. Эти волны накладывались на инерционные колебания, которые были особенно хорошо заметны в слое 30-60 м. Скорость вертикального распространения этих колебаний, была также направлена вверх и составляла до 10-15 м/час.

Таким образом, после прохождения субмезомасштабного вихря с 7 по 13 октября в анаэробном слое квази-периодически наблюдались колебания горизонтальной скорости течений, не превышавшие по абсолютной величине нескольких сантиметров в секунду. Изотерма $8,35^{\circ}\text{C}$, а с ней и слой диапаузы мезозоопланктона, а значит и граница аэробных и анаэробных вод, испытывавшие значительные вертикальные смещения в диапазоне глубин 110-150 м, все время располагались ниже динамически активной зоны, то есть, там где горизонтальная скорость течений, как правило, не превышала $0,05$ м/с.

В 2011 г. в Черном море с помощью профилографа Аквалог и размещенного на нем доплеровского измерителя Aquadopp были впервые получены вертикальные профили скорости течений с разрешением 1 м от приповерхностного слоя до придонного слоя (1020 м). Измерения проводились 17-19 июня на траверзе Геленджикской бухты за свалом глубин в открытой части акватории точке $44^{\circ}28.28$ с.ш. $37^{\circ}56.24$ в.д.

На рис. 5 представлены результаты этих измерений по данным 14 циклов спуск/подъем профилографа Аквалог. Рис. 5 детально показывает вертикальную структуру динамики течений: в верхних 100 метрах моря доминирует северо-западный перенос со скоростями до $0,27$ м/с, соответствующий Основному черноморскому течению. В слое 100-150 м происходит резкое торможение северо-западного потока, в диапазоне глубин от 200 до 400 м течения отсутствуют, а еще глубже между горизонтами 500 м и 950 м наблюдается глубинное юго-восточное противотечение, ядро которого (скорость до 3 см/с) залегает в слое 700-800 м.

3. Заключение

Представленные в докладе результаты были получены благодаря усовершенствованию техники и методики проведения морских экспериментов по исследованию мезомасштабных гидрофизических процессов, которые влияют на формирование тонкой термохалинной структуры и структурных особенностей важнейших экосистемных характеристик.

За последние два года были доработаны технические и программные средства автономного заякоренного профилирующего носителя океанологической измерительной аппаратуры Аквалог с целью интеграции датчиков различных типов. Важным результатом усовершенствования конструкции зонда-профилографа стала программно-техническая реализация режима «засыпания», обеспечивающего значительную экономию энергии источника питания и продление срока автономной работы прибора в море.

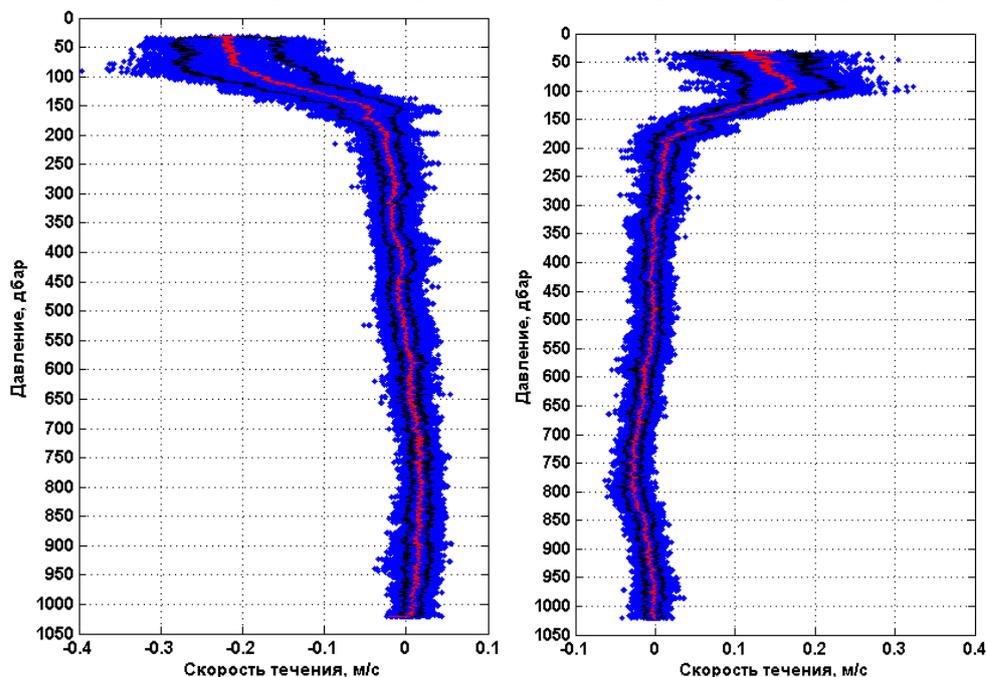


Рис. 5. Вертикальные тонкоструктурные профили зональной (слева) и меридиональной (справа) компонент скорости течений по данным измерений с помощью профилографа Аквалог 17-19 июня 2011 г. Синие точки – индивидуальные измерения, красные линии – профили средних значений, черные линии – среднеквадратические отклонения.

Была впервые осуществлена методика мультипараметрических тонкоструктурных измерений вертикальных профилей ключевых параметров морской среды в фиксированных географических точках. В экспедициях в Японском, Балтийском и Черном морях были получены длинные временные ряды вертикальных профилей различных характеристик морской среды. Одновременно с измерениями вертикальных профилей течений были получены данные о термохалинной структуре, рН воды, растворенном кислороде, акустическом рассеянии на планктоне и взвесьях.

Вышеуказанные исследования привлекли внимание зарубежных ученых, по инициативе которых начаты экспериментальные работы на заякоренных буйковых станциях, оснащенных профилографами Аквалог, в Красном, Средиземном и Японском морях.

Литература

1. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Иванов В.Н., Низов С.С., Соловьев В.А., Тимашкевич Г.К., Ци-бульский А.Л., Швоев Д.А., Кебкал К.Г. Заякоренная профилирующая океанская обсерватория // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2/8. С. 50-59.
2. Стунжас П. А. О строении зоны взаимодействия аэробных и анаэробных вод Черного моря по измерениям безмембранным датчиком кислорода // Океанология. 2000. Т.40. №4. С. 539-545.

РАСШИРЕНИЕ КОМПЛЕКТАЦИИ АВТОНОМНЫХ СЕТЕЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНЫМИ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ АППАРАТАМИ

В.А. Углев

Центр прикладных исследований СФУ
662971, Железногорск, ул. Кирова, 12а,
e-mail: uglev-v@yandex.ru

Рассматриваются вопросы применения внешних, внутренних и гибридных классов АНПА для организации эффективных автономных сетей океанографических измерений. Сделан краткий обзор возможностей расширенной комплектации АСОИ, позволяющего реализовать «интеллектуальные» робототехнические сообщества, реализуемого в рамках проекта подводного исследовательского робототехнического комплекса (ПИРК).

Развитие автономной подводной робототехники осуществляется преимущественно в трех направлениях: создание автономных необитаемых подводных аппаратов, создание донных станций (лендеров) и разработка гибридных систем на основе автономных сетей океанографических измерений (АСОИ). Масштабными проектами, реализующими АСОИ являются канадская NEPTUNE [1], американская LEO [2] и пр. Аналогичных по масштабам проектов, реализуемых на территории Российской Федерации, пока нет, хотя есть альтернативные варианты обеспечения автономной работы исследовательских роботов (например, проект САНПА [3]). На наш взгляд, дальнейшим вектором интенсивных исследований в области совершенствования АСОИ станет создание развитых вариантов интеграции автономных подводных роботов и донных станций в составе единой сети. Рассмотрим это направление подробнее.

Классификация роботизированных подводных аппаратов, приведенная в [4], разделяет все аппараты на автономные (АНПА) и дистанционно-управляемые (ДНПА). Каждый из них имеет свои преимущества: первые – работу без непосредственного участия человека; а вторые – не требуют реализации интеллектуальных систем управления. Очевидно, что для исследования просторов океана имеет преимущество АНПА, хотя функция перехвата управления оператором работы аппарата ни когда не теряет своей актуальности.

Анализ существующих подходов к построению АНПА позволяет выделить два генеральных направления: активные и пассивные аппараты. При этом их позиционирование в исследовательских работах все больше обособливается.

Пассивные АНПА по своей сути являются пространственно-стационарными объектами, несущими узко специфическую роль статической регистрации данных. Эти робототехнические системы фактически заменяют органы чувств человека (и даже превосходят их), не имеющего возможность самостоятельно участвовать в исследовании морских глубин. Функциональность таких аппаратов ограничена работой датчиков, а также обработкой и передачей данных. Пассивные аппараты становятся прообразом подводных лабораторий, способных качественно, систематически и постоянно регистрировать нужные для исследователей данные. Подводные аппараты этого класса занимают промежуточное положение между роботами первого и второго поколения. На свободном рынке пассивные подводные аппараты представлены слабо, т.к. решают строго очерченный круг специфических задач и, следовательно, имеют ограниченное число потребителей.

Активные АНПА предназначены для динамичного перемещения в воде и должны обладать развитой управляющей системой, опирающейся на интеллектуальные алгоритмы ситуационного управления. Данные робототехнические системы зачастую укомплектовываются дополнительными подвижными механизмами: манипуляторами,

системами технического зрения и тому подобное, что расширяет их функциональность. Кроме того, они предусматривают возможности интенсивного обновления программного обеспечения. Активные АНПА представлены широким перечнем моделей (см, например, [3, 4 и 5]), выполняющих поисковые, исследовательские и военные задачи. Но у них есть один серьезный недостаток: активные подводные аппараты плохо пригодны к выполнению систематических стационарных исследований, требующих длительного присутствия АНПА на определенном участке шельфа. Это связано не столько с функциями аппаратов данного класса, сколько с избыточностью возможностей, препятствующих эффективно (в первую очередь в энергетическом и стоимостном аспектах) решать систематические пространственно-локализованные задачи. Например, применение аппаратов активного класса для мониторинга биоразнообразия популяций организмов, в том виде, в котором они представлены в работе [6], представляется малоэффективным. Зато они успешно справляются с задачами картографирования и поиска. Активные АНПА занимают промежуточную стадию между роботами второго и третьего поколений. На Российском рынке подводных аппаратов они представлены в основном в качестве штучных или мелкосерийных институтских разработок: например, АНПА «Клавесин» и «Пилигрим» (Россия, Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН).

Итак, если рассматривать проект, предполагающий интеграцию этих подходов, то сразу будет выявлена группа целей, к которым должна стремиться подобная АСОИ. Это одновременно минимизация габаритных и стоимостных характеристик, а так же максимизация функциональных возможностей, имеющих универсальные технические решения. Но при этом становится очевидно, что решения, предлагаемые активным и пассивным подходами к построению и функционированию АНПА по ряду факторов противоположны:

- определенность окружающей обстановки: активные – максимальная неопределенность, а пассивные – минимальная;
- специфика действий: ситуационная и типовая соответственно;
- динамика в пространстве (мобильность): максимальная и минимальная соответственно;
- характер применения: эпизодический и систематический соответственно;
- сложность внешней реакции на регистрируемые данные и сложность реагирующих устройств (включая все виды манипуляторов): высокая и низкая соответственно;
- принципиальная перестройка алгоритмов решаемых задач: очень высокая и крайне низкая соответственно;
- частота поднятия аппарата на поверхность: высокая и низкая соответственно;
- риски потери аппарата: высокие и низкие соответственно.

Таким образом, активные АНПА можно сравнить с живым организмом, а пассивные – с интеллектуальным станком. Каждый хорош в своем классе задач, и поэтому реализуя одни качества, можно потерять эффективность проявления других.

Из проведенного сравнения следует, что реализация в рамках одного робототехнического устройства всех возможностей, отвечающих представленным факторам, не рациональна (в первую очередь, с экономической точки зрения). При этом остается открытым вопрос: каким же образом можно эффективно реализовать автономную АСОИ в глубинах моря без непосредственного ведущего участия человека? Ответом может стать многозвенная архитектура АСОИ, совмещающая активные и пассивные АНПА в рамках единого комплекса.

Поэтому одним из перспективных направлений развития возможностей АСОИ является усложнение состава донных станций роботами класса АНПА. Кроме классических *внешних* АНПА, в таких станциях возможна реализация еще двух видов роботов. Во-первых, это

внутренние роботы (не покидающие пространства базовой части АСОИ), решающие следующие задачи:

- замена блоков сломанного или модернизируемого оборудования;
- техническое обслуживание контрольно-измерительных приборов;
- операции с пробами и образцами, доставленными внешними АНПА.

Во-вторых, это *гибридные* роботы, предназначенные для решения операций на разделе станция /вода и дно:

- внешнее обслуживание станции;
- буксировка в станцию сломанных или оставшихся без энергии АНПА;
- доставка внешних АНПА или собранной ими информации на различные фрагменты АСОИ (как по вертикали, так и по горизонтали);
- способствование процессу навигации внешних АНПА (например, методом триангуляции);
- замену модулей АНПА (например, различных классов датчиков);
- транспортировка отдельные механизмы на поверхность и доставка новых.

Данный подход к разделению ролей и их комплексное выполнение позволят значительно повысить степень автономности и самостоятельности функционирования АСОИ. Концепции бионики и синергетики, подкрепленные соответствующими алгоритмами искусственного интеллекта, подсказывают, что в природе уже существуют эффективные биологические ниши, применяющие принцип разделения труда¹. В подводной робототехнике отдельные элементы совместной работы роботов уже отработаны (см., например, [3, 7 и 8]). Но проекты, посвященные построению замкнутых автономных колоний, в открытой печати не освещены и, возможно, ведутся только военными ведомствами. Очевидно, что нашей стране требуются современные АСОИ, реализовать которые необходимо по новым принципам и с доступностью широких научных кругов.

Наряду с техническими решениями, важной составляющей многофункциональной АСОИ является программное обеспечение, ориентированное на алгоритмы искусственного интеллекта. При этом упор делается на методы управления групповым поведением роботов (агентов), автономно и согласованно выполняющих те или иные работы. Это приводит к синтезу такой управляющей системы, которая, наряду с экспертными методами и нечеткой логикой, может использовать алгоритмы распознавания образов и оптимального группового поведения (генетические алгоритмы и многоагентные системы). Каждый класс роботов, входящих в АСОИ, должен иметь свое, специфическое программное обеспечение, но опираться на единый центр принятия решений². Такой подход централизации предполагает наличие общей онтологии (модели мира), которую каждый робот использует для рационального поведения в колонии.

Симбиоз различных по функциям роботов должен реализовывать принципы интеллектуализации, специализации и разделения труда. Экономическая эффективность при такой архитектуре достигается за счет того, что максимальному риску потери аппарата подвержен класс внешних АНПА (обычно, габаритов микро-НПА), производство которых максимально удешевляется. Так подавляющее число биогенных, абиогенных и антропогенных воздействий (включая чрезвычайные ситуации) будут преимущественно воздействовать на внешние, а не на внутренние и гибридные АНПА. Это позволяет базовым узлам АСОИ, при возникновении угрозы потери аппаратов, выполнять функцию станции-убежища любому классу автономных роботов, включенных в комплекс.

Повышение степени автономности и интеллектуальности АСОИ за счет расширения ее комплектации различными видами АНПА – одно из направлений, способствующих

¹ Особенно ярко это видно на примере колонии термитов, муравьев и роя пчел.

² Наиболее эффективно, когда на станции для каждого АНПА предусматривается возможность перепрошивки управляющей программы без поднятия аппарата на поверхность.

развитию подводной робототехники. На базе Центра прикладных исследований Сибирского федерального университета стартовал проект ПИРК (подводный исследовательский робототехнический комплекс), включающий в себя реализацию указанных классов подводных роботов на базе автономных сетей океанографических измерений.

Литература

1. Проект NEPTUNE (<http://www.interactiveoceans.washington.edu/story/NEPTUNE+Concept>).
2. Проект LEO (<http://marine.rutgers.edu>).
3. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общей ред. Агеева М.Д. – М.: Наука, 2005. – 400 с.
4. Бочаров Л.Ю. Анализ тенденций развития исследований и разработок в области создания подводных микроаппаратов // Нано- и микро-системная техника. URL: <http://www.microsystems.ru/files/publ854.htm>.
5. Тимохов В. Обзор по роботам за 2009 год // <http://roboting.ru/1047-obzor-po-robotam-za-2009-god.html>.
6. Дулепов В.И., Лелюх Н.Н., Кочеткова О.А., Кравченко А.Н. Экологический мониторинг донных популяций и сообществ животных по фотоизображениям с подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2010. №1(9). С. 57-64.
7. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Бычков И.В., Максимкин Н.Н., Хмельнов А.Е., Кензин Н.Ю. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2(8). С. 34-43.
8. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Иванов В.Н., Низов С.С., Соловьев В.А., Тимашкевич Г.К., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Заякоренная профилирующая океаническая обсерватория // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2(8). С. 50-59.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ НА ЗАКОН СПАДА АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

В.А. Акуличев, Л.К. Бугаева, А.А. Соловьев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, факс: (423) 2312573,
e-mail: bugaeva@poi.dvo.ru

На основе модельных вычислений строится закон спада $TL(r,z)$ вдоль протяженной трассы в северо-западной части Тихого океана Трасса, протяженностью более 2000 км, пересекала крупномасштабные неоднородности – вихрь и фронтальную зону от субтропических вод на юге до субарктических вод на севере. Применяются численные модели метода адиабатических нормальных мод и широкоугольного параболического уравнения. Вычисления проводятся в соответствии с натурными измерениями для частот 230, 600 и 850 Гц, с источником, расположенным на глубине 100 м в подводном звуковом канале в северной части трассы, и сопоставляются с соответствующими локальными законами, полученными эмпирически для приемника, расположенного на глубине 100 м. Оценивается влияние холодного вихря и фронтальной зоны на закон спада $TL(r,z) = \alpha(r,z)lg(r)$.

При дальнем распространении звука в океане основным фактором, вызывающим вариации сигналов, является присутствие крупномасштабных неоднородностей на трассе, таких как фронтальные зоны и мезомасштабные вихри. Вертикальная протяженность вихрей и фронтальных зон составляет сотни метров, горизонтальная превышает десятки километров. Акустические и гидрологические исследования распространения звука вдоль трассы, пересекающей фронтальную зону в северо-западной части Тихого океана, были выполнены с 20 августа по 3 сентября 1985 года на НИС «Академик Александр Виноградов» и НИС «Академик Несмеянов». Схема проведения эксперимента и поверхностные изотермы в районе измерений показаны на рис. 1.

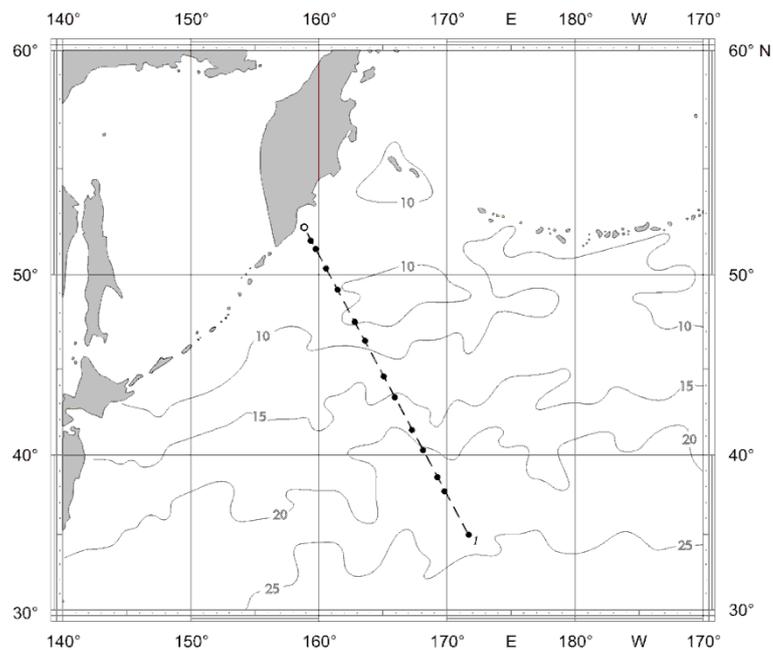


Рис. 1. Схема расположения трассы и поверхностные изотермы

Излучение сигналов с частотами 230 Гц, 600 Гц и 800 Гц производилось на глубине 100 м в отдельных точках с помощью излучателей, опускаемых в режиме дрейфа с борта судна «Академик Александр Виноградов». Длительность излучения сигналов в каждой точке составляла два часа с минутными паузами каждые четверть часа, по окончании излучения судно переходило в следующую точку трассы. Прием сигналов осуществлялся вблизи полуострова Камчатка в шельфовой зоне на глубине около 100 м. Протяженность трассы составляла 2200 км. Одновременно измерялись гидродинамические характеристики и батиметрия дна исследуемого района [1]. По данным гидрологических измерений построено пространственное поле скорости звука, представленное на рис. 2.

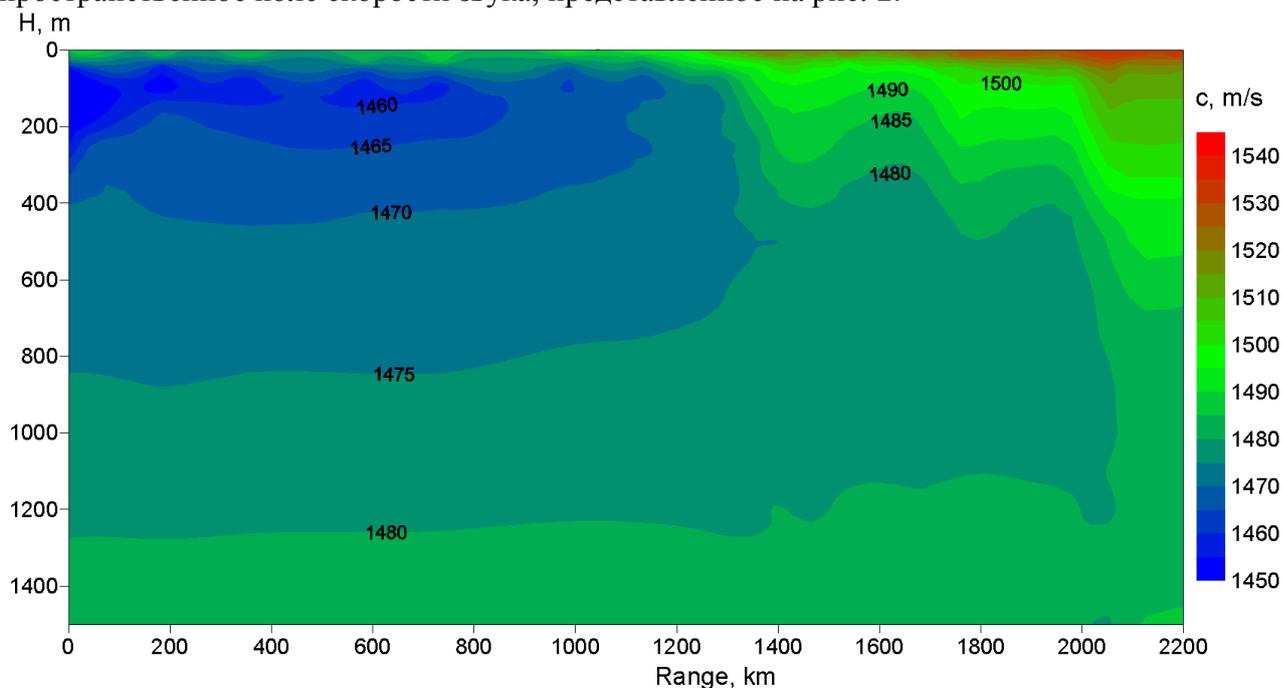


Рис. 2. Поле скорости звука вдоль акустической трассы

На дистанции около 1350 км хорошо виден фронтальный раздел между холодными субарктическими и теплыми субтропическими водами он имеет ширину около 200 км. На поверхности он выражен слабо. Максимальные горизонтальные градиенты отмечаются на глубинах 50-200 м. Проявляется фронт до глубин 1000 м. Положение фронта на поверхности смещено относительно положения на глубине 400 м по направлению к югу. Ось ПЗК претерпевает значительные изменения положения по глубине. Вблизи берегов Камчатки она залегает на глубине 70-75 м, с удалением вдоль трассы на 350-400 км заглубляется до 100-120 м и на дистанции 1300 км от побережья Камчатки, в районе фронтального раздела ось ПЗК опускается до глубины 900 м.

Используя измеренные значения скорости звука и батиметрические данные были выполнены расчеты акустического поля методом нормальных мод [3] и в приближении широкоугольного параболического уравнения Гельмгольца [2].

На рис. 3 представлена пространственная картина акустического поля для источника сигнала с частотой 230 Гц, расположенного на глубине 100 м. На верхнем рисунке, полученном методом нормальных мод, приведен уровень интенсивности с учетом частотного поглощения с расстоянием, в то время как на нижнем рис. 3 приведено поле огибающей, без учета частотного поглощения с расстоянием.

Видно, что энергии звука перераспределяется по глубине канала, начиная с дистанции 1350 м. В начале трассы звук концентрируется вдоль оси канала на глубине 100 м, далее при пересечении фронтальной зоны, энергия распределяется по более широкому каналу, расположенному в субтропических водах.

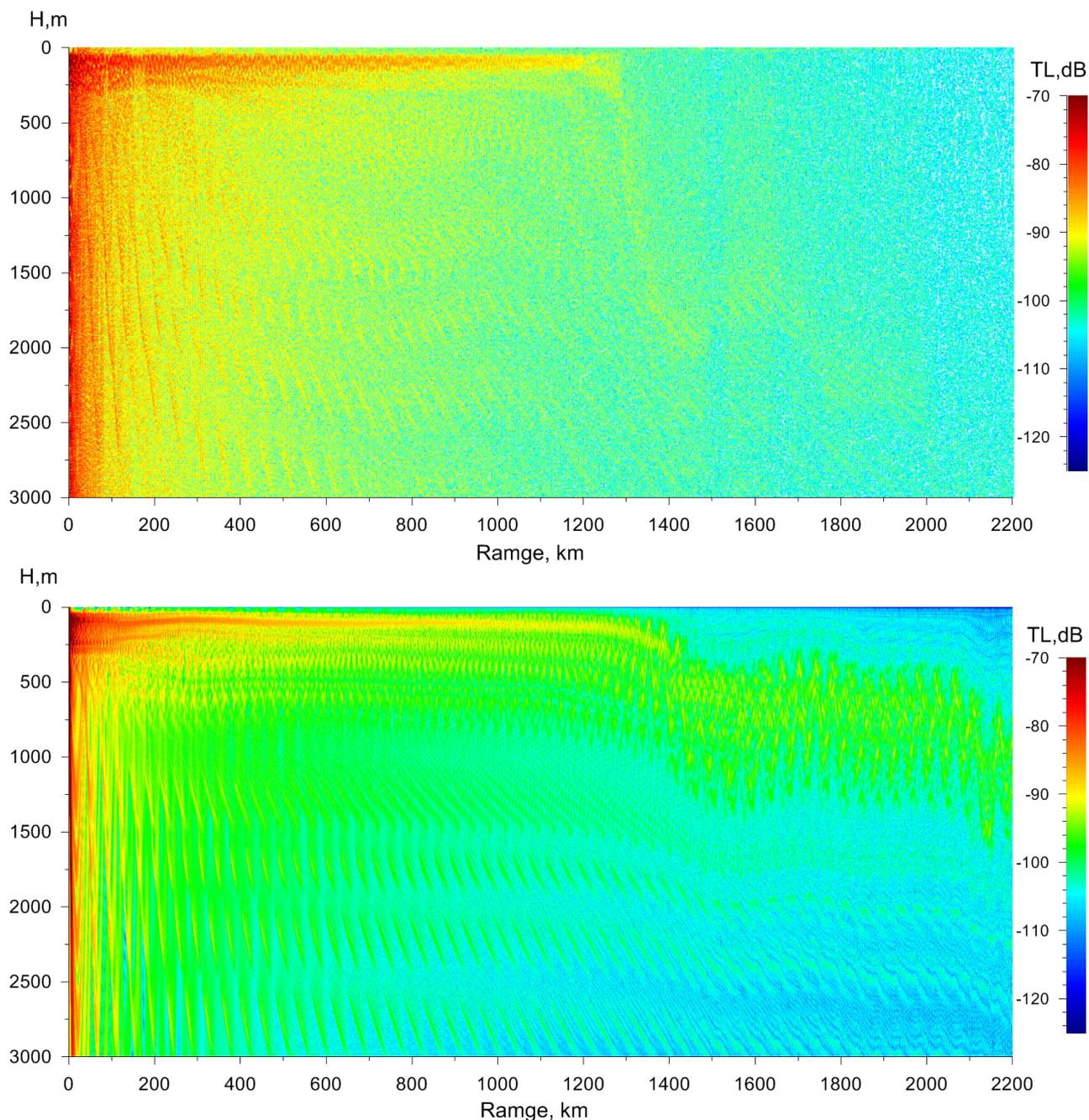


Рис. 3. Пространственная структура акустического поля вдоль трассы в приближении нормальных мод и широкоугольном параболическом приближении

Для количественной оценки влияния фронтальной зоны на распространение звука по трассе мы вычисляем уровни потерь на горизонтах приема 100, 400, 700 и 1000 м. Мы отправляемся от следующей стандартной модели: для выражения уровня звука: $p = Ar^n \exp(-\alpha r)$. В этой формуле A представляет источник звука, n – коэффициент затухания и α – коэффициент поглощения звука в среде, зависящий от частоты, r – расстояние до источника звука. В логарифмическом представлении формула принимает вид:

$$TL(r) = B + n20 \lg r + \beta r \quad (1)$$

Поскольку в вычислительной модели, в отличие от реальности α – константа для данной частоты, мы изучаем влияние фронтальной зоны на распространение звука на фиксированном горизонте, рассматривая коэффициент затухания $n(r)$, рассчитывая его методом регрессии при скользящем окне шириной 200 км.

На рис. 4 сверху показаны измеренные и вычисленные в приближении нормальных мод и в широкоугольном параболическом приближении потери при распространении сигнала с частотами 230 Гц и 600 Гц на глубине приема 100 м, снизу показана аппроксимация для коэффициента затухания $n(r)$.

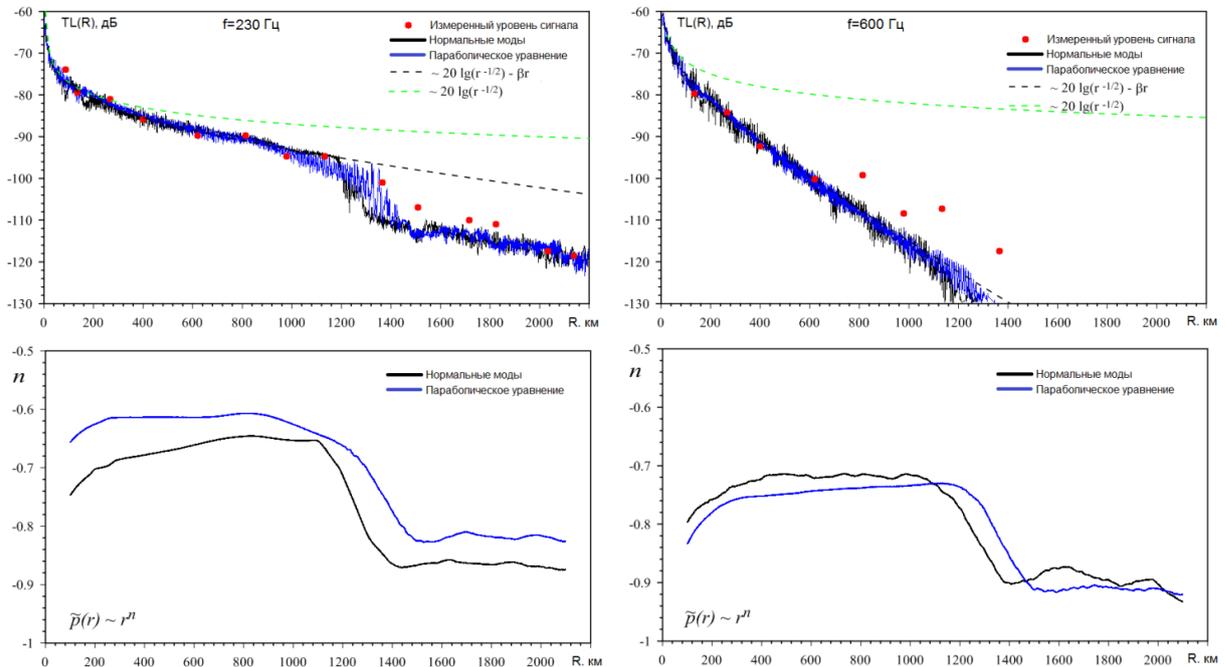


Рис. 4. Вверху приведены измеренные и вычисленные в приближении нормальных мод и параболическом приближении потери для сигнала с частотой 230 Гц и 600 Гц на глубине приема 100 м, снизу показана аппроксимация для коэффициента затухания $n(r)$

Из рисунка видно, что до фронтальной зоны модельные вычисления хорошо согласуются с натурными измерениями. Однако, в области фронтальной зоны и далее, это совпадение нарушается. На верхних графиках рисунка 4 также приведены по две теоретические кривые, одна из которых соответствует формуле (1), с $n=-0.5$, соответствующему цилиндрическому закону затухания и $\square=-0.0061$ для частоты 230 Гц и $\square=-0.033$ для частоты 600 Гц. Другая теоретическая кривая соответствует формуле (1) с $\square=0$. Эти кривые подчеркивают, что на высокой частоте 600 Гц закон спада определяется коэффициентом поглощения \square . На рис. 5 в верхней половине представлены графики потерь на горизонтах приема 100 м, 400 м, 700 м, 1000 м, для частот 230 Гц и 600 Гц (для частоты 230 Гц и для горизонта 2500 м), без учета поглощения звука. В нижней части рис. 5 приведены графики, соответствующие коэффициенту затухания $n(r)$. На горизонте 100 м, где проходит ось ПЗК и расположен приемник и излучатель, показатель степени после прохождения фронтального раздела резко опускается на 0.2. На горизонте 400 м, расположенном ниже оси ПЗК колебания показателя значительно слабее. На горизонтах 700 м и 1000 м, куда опускается ось ПЗК после фронтального раздела, значения показателя плавно возрастают на 0.1. Характер изменения показателя n для частоты 600 Гц близок к значению показателя затухания на частоте 230 Гц. Интересно то, что влияние фронтальной зоны заметно на глубине 2500 м, где после фронтальной зоны заметно его возрастание на 0.03.

Анализ закона спада звукового уровня для различных глубин приема, позволяет найти место расположения ФЗ и ее глубину не прибегая к прямым методам измерения.

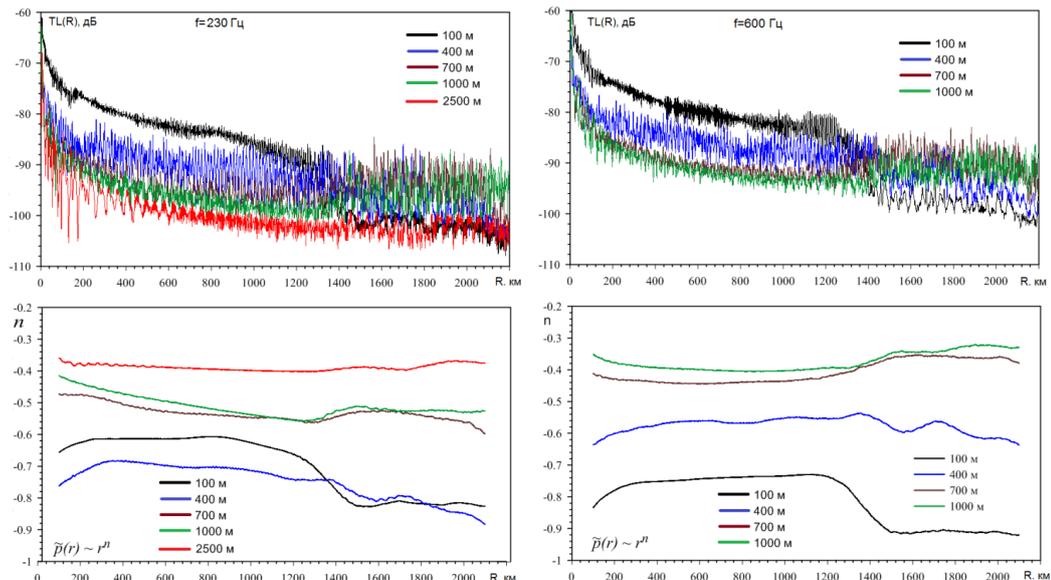


Рис. 5. Уровень потерь без учета поглощения: сверху – на горизонтах приема 100, 400, 700, 1000 и 2500 м для частот 230 Гц и 600 Гц; снизу – коэффициент затухания $n(r)$

Приведенные результаты экспериментов и результаты численного моделирования свидетельствуют о существенном влиянии фронтальной зоны на структуру звукового поля в океане. Анализ изменчивости уровней звука вдоль акустической трассы позволяет рассчитать положение фронтальной зоны не прибегая к прямым методам измерения гидрологических параметров в районе с изменчивыми во времени гидродинамическими характеристиками.

Экспериментальные данные изменения уровня звукового поля для приемников на различных глубинах и различных частотах хорошо согласуются с модельными расчетами. Таким образом, используя данные дистанционного акустического зондирования и численное моделирование можно получать оперативную информацию о структуре и локальных характеристиках крупномасштабных неоднородностей в исследуемой области океана на больших пространствах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект и № 11-05-98591-р_восток_a и в рамках научной школы НШ-3641.2010.5

Литература

1. Akulichev V.A., Bugaeva L.K., Morgunov Yu.N., Polovinka Yu.A., Solovjev A.A. Influence of Warm Mesoscale Eddy on Sound Propagation in the Region of Kuroshio // The 10th Western Pacific Acoustics Conf. WESPAC X, Beijing, China, 21-23 September, 2009. China, 2009. P. 88.
2. Knighly G.H., Lee D., Mary D.F. Higher-order parabolic wave equation // JASA, 1987. V.82, №2. P. 580-587.
3. John F. Miller and Stepfen N.Wolf. Modal acoustic transmission loss (MOATL): A transmission – loss computer program using a normal-mode model of the acoustic field in the ocean. NR laboratory, Washington, 1980.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСТАНЦИЙ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИМПУЛЬСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНАХ

Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, А.В. Буренин, В.В. Безответных, Е.А. Войтенко, П.Г. Кушнир, Д.С. Стробыкин, А.А. Азаров, М.С. Лебедев

Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел.: (423) 231-16-31, факс: (423) 231-25-73,
e-mail: yrivlad@poi.dvo.ru

Точность определения дистанций и позиционирование подводных объектов в мелководных акваториях акустическими методами зависят, как от технических характеристик используемых систем, так и от заданных при расчетах, параметров среды. Если влияние динамических процессов на формирование гидрологических характеристик среды в акваториях существенно, то такие процессы также влияют на указанные точности. В представленном докладе подробно рассмотрено влияние гидрологических условий на вариации времен приходов на двух стационарных акустических трассах в бухте Витязь, с приемом в одной и той же точке, выполненных синхронно. Приведены результаты аналогичных измерений на шельфе Японского моря и в Корейском проливе. Полученные, по результатам экспериментов, данные позволяют оценить точности расчета дистанций вдоль акустических трасс, на различных периодах времени наблюдений с учетом пространственно-временной изменчивости скорости звука и уровня прилива.

Создание систем подводной акустической навигации и дальнометрии предполагает использование алгоритмов, позволяющих выполнять рабочие функции в разнообразных и достаточно сложных условиях окружающей среды. Для миссий в мелководных акваториях факторами, вызывающими сбои в работе акустических систем подводной навигации могут быть эффекты многолучевости и «замирания» сигналов. Точность позиционирования, при этом, зависит как от точности измерения времени распространения сигналов от маяков-ответчиков, так и от параметров среды, определяющих скорость распространения звуковых импульсов. Ошибки в расчете горизонтальных дистанций в мелководных районах могут возникать при длительных миссиях даже за счет приливных изменений уровня, если эти изменения существенны по сравнению с глубиной акватории. В работе исследуется влияние параметров среды на характер распространения импульсных сигналов, с целью оценки точности измерения дистанций в мелководных акваториях.

Комплексные акустические и гидрологические измерения, результаты которых анализируются и используются для оценок точности позиционирования, проводились с 2005 года по 2010 год в бухте Витязь, на шельфе Японского моря и в Корейском проливе в диапазоне глубин от 8 м до 50 м. Основными элементами схемы акустических измерений являлись синхронизированные во времени системы излучения, приема, регистрации и обработки импульсных фазоманипулированных м-кодами сигналов [1]. Измерение координат точек стационарно установленных на дне излучателей и приемников, а также промер глубин и вертикальных профилей гидрологических параметров вдоль трасс распространения акустических сигналов выполнялись с помощью стандартных судовых навигационных и измерительных систем. Основные приемы и результаты анализа рассмотрим на примере эксперимента в бухте Витязь 12-13 июля 2010 года. В заключение приведены результаты экспериментов, проведенных по аналогичной схеме в других районах.

Относительные изменения уровня за рассматриваемый период времени составляли от 0,1 до 0,35 метра, рис. 3. Результаты акустических измерений функций отклика канала (ФОК) в течение времени эксперимента для обеих трасс приведены на рис. 4, а, б.

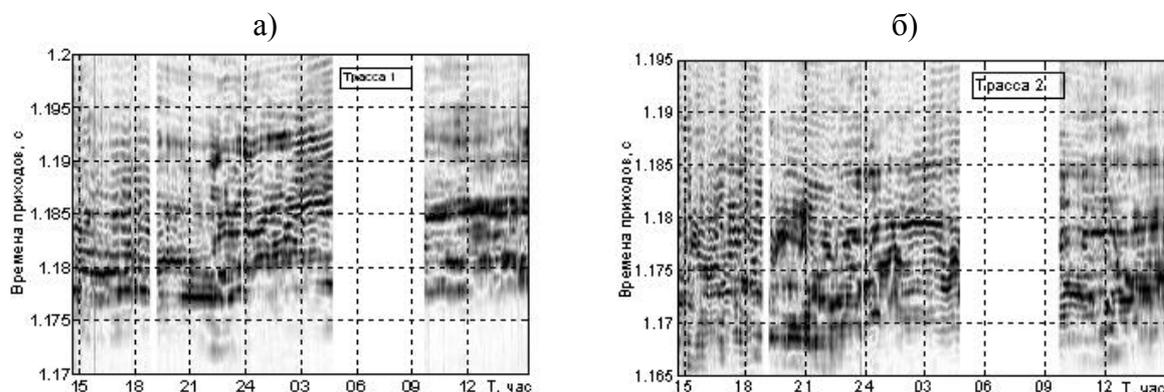


Рис. 4. Графики зависимостей функций отклика каналов от времени эксперимента: а) трасса 1, б) трасса 2

Для ФОК, измеренных вдоль обеих трасс наблюдается сильно выраженная многолучевость (от 15 до 20 приходов групп собственных лучей) на интервалах времени от 25-30 мс. Также на рис. 4. видна изменчивость ФОК в течение суточного интервала наблюдений. Для идентификации структуры, экспериментально измеренных ФОК, использовалось численное моделирование в соответствии с условиями эксперимента. Результаты численного моделирования показали, что ФОК (для обеих трасс) формируются группами лучей в диапазоне углов выхода $[+25-25]$ градусов, с числом отражений от поверхности от 0 до 9 и от дна от 3 до 9. Формирование кластеров в ФОК происходит за счет 3-4 групп лучей, в общем, из всего диапазона углов выхода. Однако, в диапазонах углов выхода лучей $[-3+10]$ градусов для 1-й трассы и $[0-7]$ градусов для 2-й трассы наблюдается картина придонного (без отражений от поверхности) распространения звука для нескольких групп лучей.

Расчет дистанций и позиционирование под водой по результатам импульсного акустического зондирования для нашего случая осуществляется по времени распространения двух импульсных сигналов от двух излучателей с известными координатами мест установки и приемом на одиночный гидрофон:

$$D_i(t) = \tau_i \times \overline{C(r_i, t)} \quad (1)$$

где $i=1,2$ – номера трасс распространения (номера излучателей), $D_i(t)$ – горизонтальная дистанция от излучателя до приемника, в общем случае зависящая от времени измерений t , τ_i – время распространения импульсного сигнала по i -й трассе, $\overline{C(r_i, t)}$ – средняя по i -й трассе скорость звука для времени измерения t . Возможны иные схемы позиционирования и измерений дистанций, например, по времени распространения одного импульсного сигнала, принятому системой как минимум из двух разнесенных и синхронизированных во времени приемных гидрофонов и др. Для подобных систем, основные результаты анализа будут также справедливы.

Рассмотрим основные моменты измерений и задания каждого параметра в выражении (1). Основной измеряемой величиной для определения дистанций по обеим трассам в (1) являются времена приходов импульсов – τ_i . Как следует из вида ФОК на рис. 1 и рис. 5, необходимо на интервале времени задания ФОК $[\tau_{i,first} - \tau_{i,last}]$, выбрать (измерить) расчетное время прихода импульса $\tau_{i,o} \subset [\tau_{i,first} - \tau_{i,last}]$.

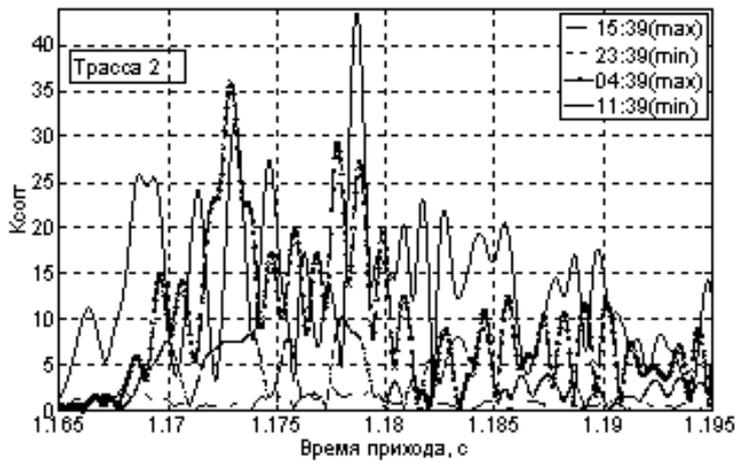


Рис. 5. Функции отклика для 2-й трассы

максимальному приходу, по последнему приходу в ФОК (рис. 6). На первом этапе рассмотрим вариации во времени максимумов ФОК. В таблице 1 приведены некоторые характеристики для рассматриваемых групп времен приходов. Из приведенных на рис. 6 и в таблице 1 результатов обработки, следует, что минимально изменилось время приходов первой группы лучей как при измерениях на первой (0,008 с), так и на второй (0,009 с) трассах. Изменение времен прихода групп лучей в ФОК с максимальной амплитудой и последней группы лучей (0,015-0,02 с) больше в два раза, чем для первой группы. Вариации дальности (уравнение 1), рассчитанной по временам прихода, в предположении постоянной скорости звука, составляют от 10 м (min) до 24 м (max) для каждой трассы в течение суток. Оценка влияния приливных изменений уровня на время распространения проводилась авторами в [2] и для условий данного эксперимента, рис. 3, составляет 1-2 мс (1,5-3 м). Компенсировать вариации дальности (повысить точность позиционирования) можно, учитывая изменения индивидуальных средних эффективных скоростей во времени для каждой группы приходов, таблица 2. Определение эффективных скоростей для каждой группы приходов может производиться как в режиме калибровки, при измерении горизонтальной дистанции по данным GPS, так и расчетом Сэф вдоль траекторий собственных лучей, формирующих эти группы. В рассматриваемом случае использовались оба варианта.

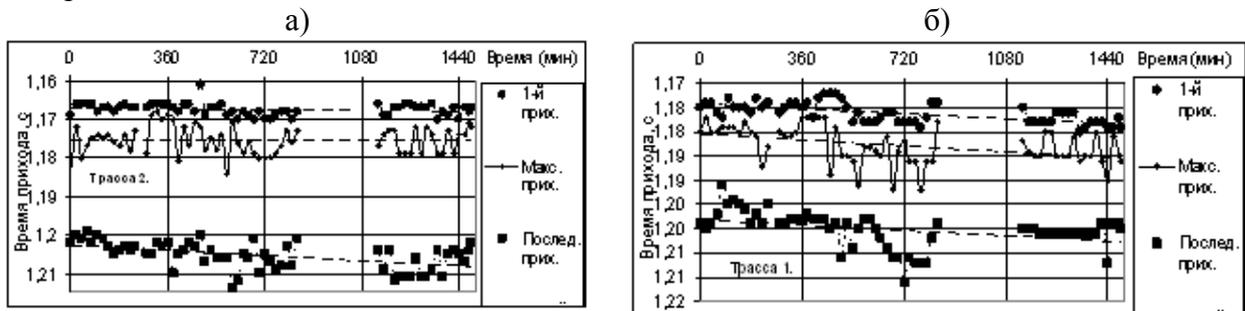


Рис. 6. Изменчивость времен прихода трех групп собственных лучей вдоль первой – а) и второй – б) трасс

В нашем случае приемник и источники сигналов неподвижны в пространстве, все виды изменчивости ФОК связаны с влиянием только окружающей среды и диапазон $[\tau_{i,first} - \tau_{i,last}]$ слабо зависит от времени. Но даже в данном, относительно простом по сравнению с перемещающимся в пространстве приемником, случае выбор $\tau_{i,o}$ неоднозначен. Нами рассмотрены три варианта выбора $\tau_{i,o}$:

по первому приходу, по

максимальному приходу, по последнему приходу в ФОК (рис. 6). На первом этапе

рассмотрим вариации во времени максимумов ФОК. В таблице 1 приведены некоторые

характеристики для рассматриваемых групп времен приходов. Из приведенных на рис. 6 и в

таблице 1 результатов обработки, следует, что минимально изменилось время приходов

первой группы лучей как при измерениях на первой (0,008 с), так и на второй (0,009 с)

трассах. Изменение времен прихода групп лучей в ФОК с максимальной амплитудой и

последней группы лучей (0,015-0,02 с) больше в два раза, чем для первой группы. Вариации

дальности (уравнение 1), рассчитанной по временам прихода, в предположении постоянной

скорости звука, составляют от 10 м (min) до 24 м (max) для каждой трассы в течение суток.

Оценка влияния приливных изменений уровня на время распространения проводилась

авторами в [2] и для условий данного эксперимента, рис. 3, составляет 1-2 мс (1,5-3 м)

Компенсировать вариации дальности (повысить точность позиционирования) можно,

учитывая изменения индивидуальных средних эффективных скоростей во времени для

каждой группы приходов, таблица 2. Определение эффективных скоростей для каждой

группы приходов может производиться как в режиме калибровки, при измерении

горизонтальной дистанции по данным GPS, так и расчетом Сэф вдоль траекторий

собственных лучей, формирующих эти группы. В рассматриваемом случае использовались

оба варианта.

Таблица 1. Параметры групп приходов для двух трасс

Значения	1-я трасса			2-я трасса		
	1-й прих., с	Макс. прих., с	Посл. прих., с	1-й прих., с	Макс. прих., с	Посл.прих., с
Max	1,180	1,192	1,211	1,170	1,184	1,214
Min	1,172	1,177	1,191	1,161	1,168	1,199
Max-Min	0,008	0,015	0,020	0,009	0,016	0,015
Disp	4,167E-06	1,457E-05	1,291E-05	2,411E-06	1,284E-05	1,282E-05

Результаты длительных экспериментальных исследований функции отклика акустического канала на шельфе Японского моря (таблица 3) позволяют прогнозировать ее параметры и диапазон изменчивости эффективных скоростей звука для расчета дальностей как на суточных циклах, так на сезонных периодах времени. Следует отметить слабую изменчивость времен прихода в период с декабря по июнь, что позволяет для обеспечения максимальной точности при расчете дистанций вводить небольшие поправки (порядка 1-2 м/с) в используемые значения эффективной скорости. С июня по ноябрь месяц, увеличивается вертикальная неоднородность распределения скорости звука. Это приводит к более широкому диапазону вариаций времен прихода, и соответственно увеличению диапазона изменений эффективной скорости звука при расчетах до 3-5 м/с. Влияние «приливной» составляющей в вариациях времен прихода для условий экспериментов составляет порядка 1,0-2,0 мс.

Таблица 2. Диапазоны изменений эффективных скоростей звука для компенсации ошибок измерения дальностей по обеим трассам

Значения	1-й прих. время распр., с			Мах прих. время распр., с			Посл. прих. время распр., с		
	Сэф, м/с	Трасса 1	Трасса 2	Сэф, м/с	Трасса 1	Трасса 2	Сэф, м/с	Трасса 1	Трасса 2
Сmin=	1490	1,1800	1,1706	1475	1,1920	1,1825	1452	1,2109	1,2012
Сmax=	1500	1,1721	1,1628	1493,5	1,1772	1,1678	1476	1,1912	1,1817
Разница	10	-0,0079	-0,0078	18,5	-0,0148	-0,0146	24	-0,0197	-0,0195

Эксперимент в Корейском проливе, проводился в условиях малых глубин (<12 м) и небольшой дистанции (614,3 м). Относительные изменения времен приходов в течение суток не превышали 1,5 мс. Для обеспечения высокой точности позиционирования, в этом случае требуется корректировка Сэф в диапазоне 1523,8-1527,6 м/с. Следует учитывать, что в данном случае изменение времен прихода обусловлено в основном приливными изменениями уровня (порядка 1,1 м). Это подтверждается результатами численного моделирования и измерениями профиля скорости звука с периодичностью один раз в час. Изменения скорости звука по глубине и во времени составляли не более 2 м/с.

Таблица 3. Времена приходов и диапазон эффективных скоростей при распространении звука на шельфе Японского моря и Корейском проливе

	Март			Июнь			Сентябрь		
	1-й прих., с	Макс. прих., с	Посл. прих., с	1-й прих., с	Макс. прих., с	Посл. прих., с	1-й прих., с	Макс. прих., с	Посл. прих., с
Max	1,449	1,452	1,522	1,430	1,430	1,500	1,430	1,430	-
Min	1,448	1,451	1,521	1,426	1,426	1,496	1,425	1,425	-
Max-Min	0,001	0,001	0,001	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	-
Cmax	1449,7	1446,2	1379,7	1471,6	1471,6	1402,7	1472,6	1472,6	-
Cmin	1448,7	1445,2	1378,8	1467,5	1467,5	1399,0	1467,5	1467,5	-
	Декабрь			Корея, сентябрь					
Max	1,443	1,447	1,502	0,403	0,411	0,422			
Min	1,441	1,445	1,498	0,402	0,410	0,420			
Max-Min	0,002	0,002	0,004	0,001	0,001	0,002			
Cmax	1456,3	1452,2	1400,9	1527,6	1497,1	1462,1			
Cmin	1454,3	1450,2	1397,1	1523,8	1494,9	1455,2			

Работа выполнена с частичной поддержкой РФФИ (проект 09-05-00074-а) и гранта Президента РФ для поддержки научных школ (НШ-3641.2010.5).

Литература

1. Akulichev V.A., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.A., Voytenko E.A., Kamenev S.I., Morgunov Yu.N., Polovinka Yu.A., Strobikin D.S. Remote Acoustic Sensing Methods for Studies in Oceanology // Ocean Science Journal. 2006. V. 41, №2. P.105-111.
2. Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Стробыкин Д.С. Экспериментальные исследования влияния прилива на формирование акустического поля на стационарной трассе в шельфовой зоне Японского моря // Акустический журнал. 2008. Т. 54, №3. С.587-588.

ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫЕ СИГНАЛЫ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ

С.И. Каменев

Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43,
тел.: (423) 2311631, факс: (423) 2312573, e-mail: kamenev@poi.dvo.ru

Рассматриваются сложные фазоманипулированные сигналы, составленные из символов разной амплитуды, что позволяет при малом числе символов существенно улучшить корреляционные свойства таких сигналов. Обсуждаются методы согласования сигналов с полосой пропускания и динамическим диапазоном систем излучения и приема.

В работах [1, 2] предложен подход по модификации 5-позиционного сигнала Баркера путем дополнительной амплитудной манипуляции составляющих его символов. Так, если для немодифицированного сигнала Баркера $\{1,1,1,-1,1\}$ для взаимной корреляционной функции (ВКФ) имеем $\{1,0,1,0,5,0,1,0,1\}$, то для модифицированного, с соотношением амплитуд 1:2, а именно для сигнала $\{1,2,2,-2,1\}$, ВКФ имеет вид: $\{1,0,0,0,14,0,0,0,1\}$. Подавление боковых лепестков ВКФ в 14 раз относительно главного максимума для приведенной 5-символьной последовательности сравнимо с непериодической 255-символьной последовательностью Хафмена (M-последовательностью) [3]. Немаловажным фактом является также равенство нулю всех боковых лепестков ВКФ модифицированного сигнала, кроме крайних. Для M-последовательностей этот эффект обычно реализуется путем периодической продолженности последовательности и дополнительной манипуляции символов.

Увеличение соотношения амплитуд символов при модификации рассматриваемых сигналов позволяет получить еще больший уровень подавления боковых лепестков. В таблице приведены результаты расчетов для 5- и 7-позиционных сигналов Баркера. Здесь же для сравнения приведены данные для 255-символьной M-последовательности. Для сигналов с соотношением амплитуд символов большим 1:2 предлагается нелинейное сжатие, приводящее к соотношению 1:2.

Таблица 1. Параметры сигналов

Последовательность	Число символов	Соотношение амплитуд символов	Степень нелинейного сжатия	Подавление боковых лепестков ВКФ
Баркера	5	1:1	1	5
Баркера	5	1:2	1	14
Баркера	5	1:4	2	34
Баркера	5	1:8	3	98
Баркера	7	1:1	1	7
Баркера	7	1:2	1	18
Баркера	7	1:4	2	53
Баркера	7	1:8	3	198
Хафмена	255	1:1	1	≈16

Применяемые нами в системах навигации и связи гидроакустические излучатели псевдослучайных сигналов обладают достаточно высокой добротностью, которая обусловлена их конструктивными и технологическими характеристиками [4]. Воспроизведение фазоманипулированных сигналов такими излучателями без искажений возможно при длине символа последовательности не менее 6-8 периодов несущей частоты. Этим достигается согласование полосы сигнала с частотной характеристикой излучателя. Дополнительной процедурой, улучшающей частотную характеристику сигналов, является сглаживание функцией вида $1+\cos(x)$, в результате чего манипуляции фазы происходят при нулевой амплитуде. Нелинейное сжатие позволяет уменьшить динамический диапазон систем излучения и приема.

Проиллюстрируем сказанное для 5-позиционного сигнала Баркера с соотношением амплитуд символов 1:8. На рис. 1 приведен сигнал и его амплитудный спектр как результат сглаживания. Несущая частота сигнала 8269 Гц, число периодов несущей частоты на символ 12. В приемнике этот сигнал используется в качестве опорного.

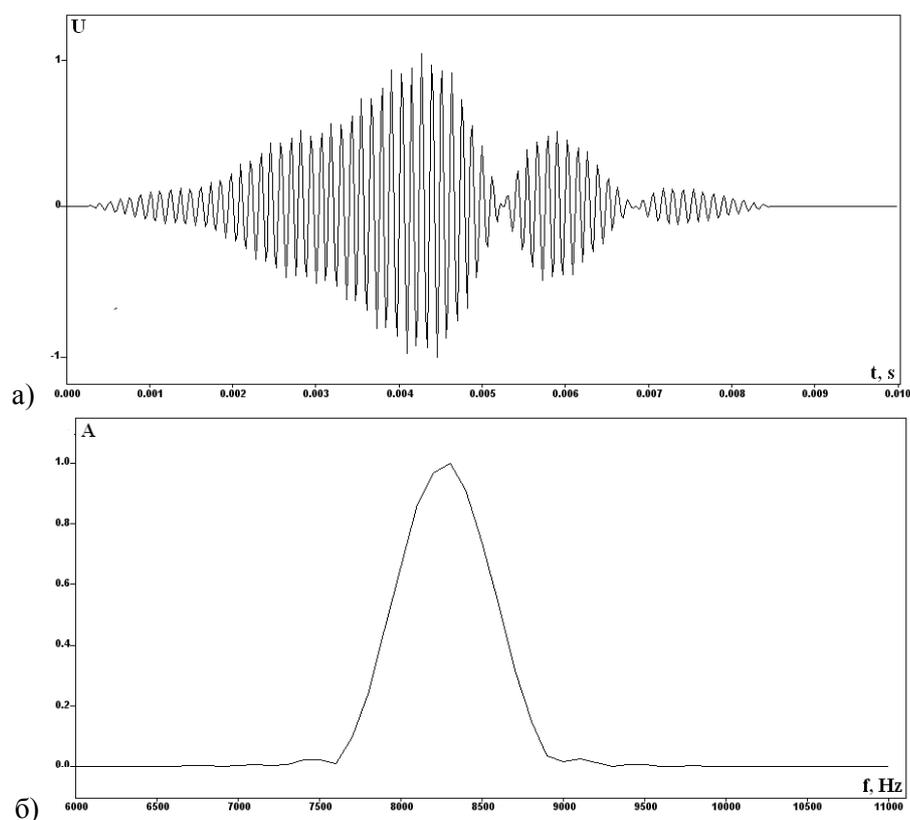


Рис. 1. Опорный сигнал (а) и его амплитудный спектр (б)

На рис. 2 показан сигнал, полученный в результате нелинейного сжатия предыдущего сигнала. Сжатый сигнал излучается в среду, на приемном конце осуществляется обратное преобразование и вычисляется ВКФ восстановленного сигнала с опорным (или осуществляется согласованная фильтрация). Результат обработки для одного прихода показан на рис. 3.

В качестве другого примера выберем 5-позиционный сигнал Баркера с соотношением амплитуд 1:2 и шестью периодами несущей частоты 4134 Гц на символ для формирования дальномерной шкалы. Обычная процедура формирования заключается в посылке дальномерного сообщения через равные промежутки времени, причем сообщение, соответствующее максимальной дальности, передается с обратным знаком, обозначая конец шкалы [3]. На основе выбранного сигнала сформируем неравномерную шкалу (рис. 4).

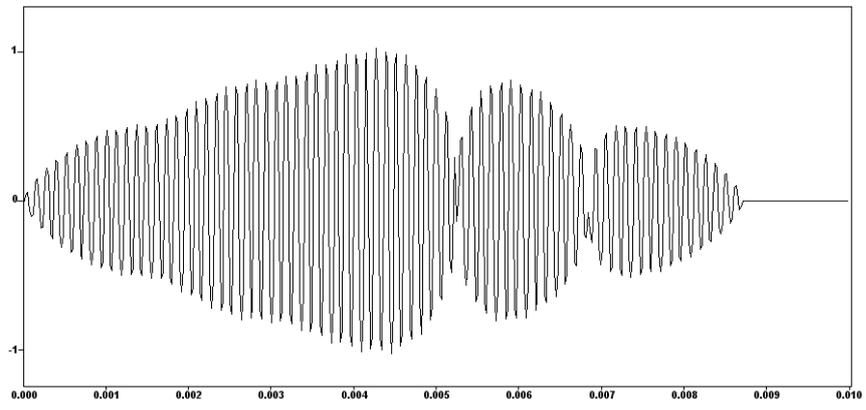


Рис. 2. Излучаемый сигнал

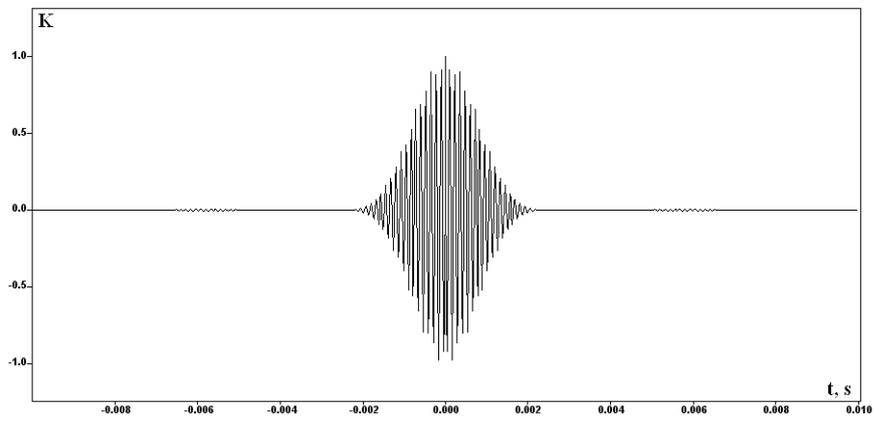
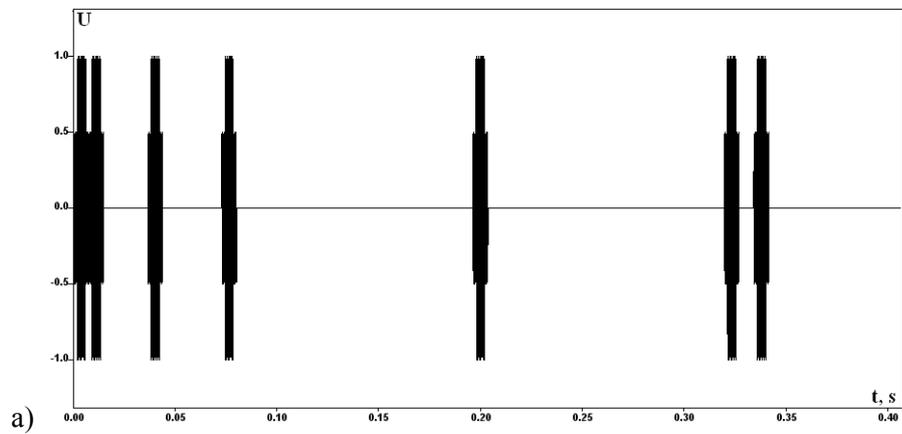
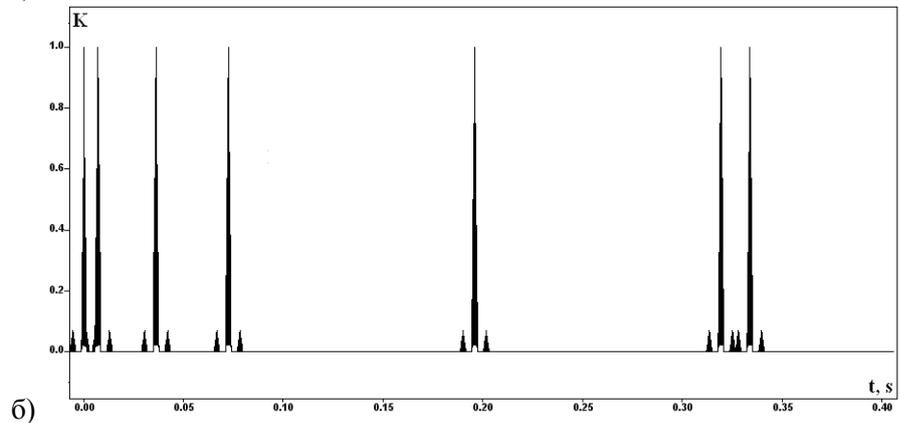


Рис. 3. Нормированная ВКФ



а)



б)

Рис. 4. Дальномерная шкала: а) излучение, б) ВКФ

Приведенная шкала имитирует поток Пуассона [5, 6] и, в силу псевдослучайного характера, повышает помехоустойчивость и имитостойкость системы. Применение короткого сигнала в качестве дальномерного сообщения позволяет обрабатывать шкалу в приемной системе целиком и не требует обозначения конца шкалы.

Для детализации дальномерной шкалы сформируем два составных сигнала из 5- и 7-позиционных сигналов Баркера с соотношением амплитуд 1:2 (рис. 5). Каждый сигнал состоит из 35 символов и имеет соотношение амплитуд 1:4.

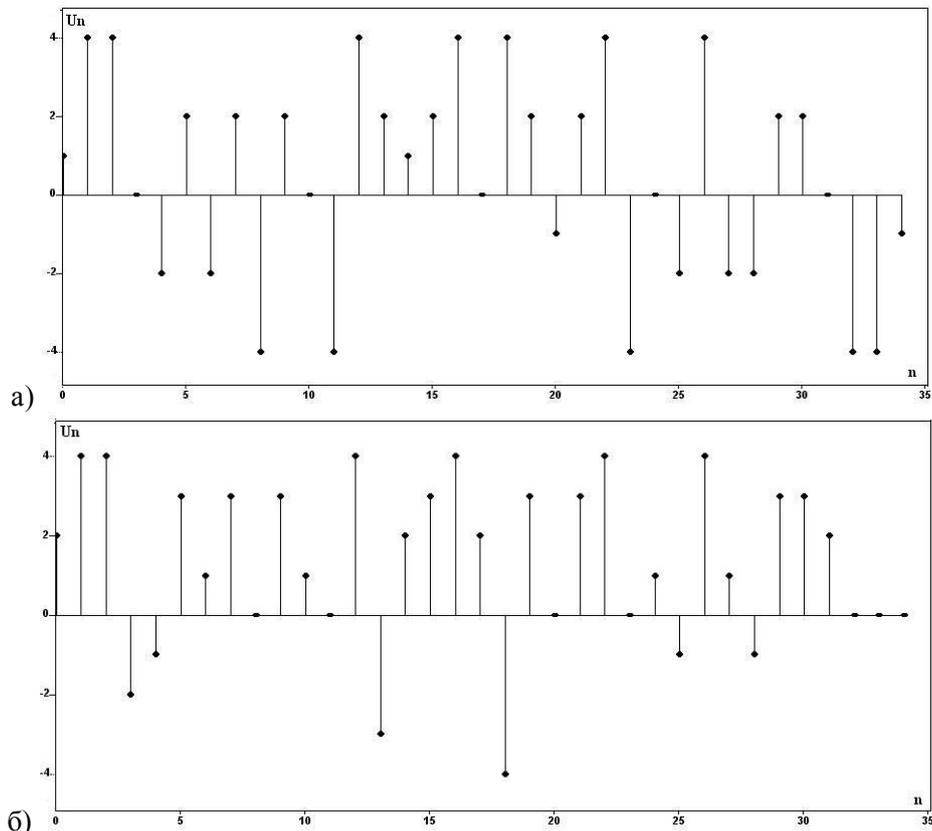


Рис. 5. Составные сигналы: а) №1, б) №2

В качестве дальномерного сообщения используется сигнал №1. В приемнике вычисляется ВКФ с сигналом №1 в качестве опорного для синхронизации и получения грубого отсчета (рис. 6, а, рис. 6, б). После синхронизации вычисляется ВКФ принятого сигнала с опорным сигналом №2, в результате чего формируется нониусная шкала (рис. 6, в).

В заключение отметим, что короткие последовательности также позволяют:

- существенно снизить энергозатраты при излучении;
- повысить частоту дискретизации для улучшения фазочастотных характеристик генерируемых и обрабатываемых сигналов;
- улучшить выделение отдельных приходов, так как ВКФ данных последовательностей имеет нулевой уровень боковых лепестков вблизи максимума (в отличие от корреляционного шума ВКФ непериодических М-последовательностей);
- улучшить параметры систем по борьбе с аддитивными и мультипликативными помехами;
- в режиме гидролокации уменьшить мертвую зону и уменьшить влияние реверберации;
- увеличить пространственное разрешение при использовании сигналов в задачах мониторинга неоднородностей морской среды и сейсмопрофилирования морского дна.

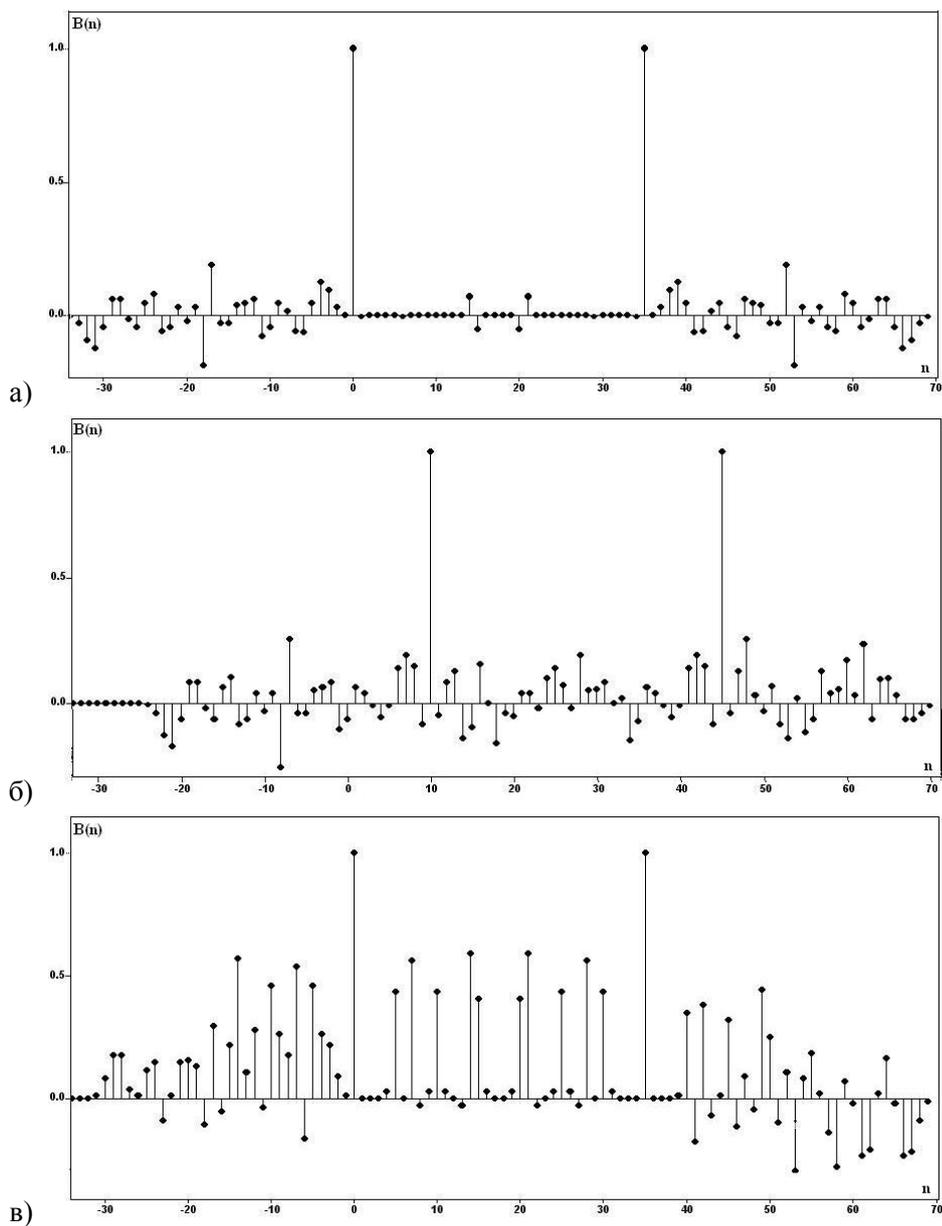


Рис. 6. ВКФ составных сигналов: грубая шкала после синхронизации (а), рассинхронизация на 8 символов (б), нониусная шкала (в)

Литература

1. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М: Советское радио, 1966. – 680 с.
2. Бенжамин Р. Анализ радио- и гидролокационных сигналов. – М: Воениздат, 1969. – 256 с.
3. Диксон Р.К. Широкополосные системы – М: Связь, 197. – 304 с.
4. Каменев С.И., Тагильцев А.А. Исследование характеристик режимов работы гидроакустических излучателей сложных фазоманипулированных сигналов // Технические проблемы освоения Мирового океана: мат-лы докл. 3-й Всеросс. науч.-техн. конф, Владивосток, 22-25 сентября 2009 г. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 216-220.
5. Ольшевский В.В. Статистические свойства морской реверберации. – М.: Наука, 1966. – 202 с.
6. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Том 2. Получисленные алгоритмы. – М.: Мир, 1977. – 724 с.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА ВДОЛЬ ТРАСС ДЛЯ СХЕМЫ ДВИЖУЩИЙСЯ ИСТОЧНИК – СТАЦИОНАРНЫЙ ПРИЕМНИК

Н.И. Дюльдина

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43,
тел.: (423) 237-49-13, e-mail: duldina32@mail.ru

Теоретические оценки результатов гидроакустических экспериментов, в которых применяется схема фиксированный приемник – движущийся источник, базируются на модово-лучевых представлениях, т.е. на модификациях решений уравнения Гельмгольца. При этом предполагается обратимость положений источника и приемника, исходя из принципа взаимности. В докладе рассмотрены существующие теоремы взаимности, пределы их применимости. Приведены экспериментальные данные о соответствии интенсивностей звуковых сигналов, принятых и излученных в сходных и различных структурах вод. Обсуждается возможность наиболее точной теоретической оценки данных экспериментов, проведенных при движущемся излучателе.

Широко используемый в акустике принцип взаимности позволяет определять характеристики звукового поля, инвариантные относительно перестановки источника и приемника. Первая теорема взаимности была сформулирована Релеем для точечного источника в неограниченной неоднородной стационарной среде. Давление, создаваемое в точке В источником, находящимся в точке А, равно давлению, создаваемому в точке А таким же источником, помещенным в точку В. Однако для резонансных систем принцип взаимности справедлив только для некоторых частных случаев, которые должны рассматриваться и доказываться отдельно. В общем случае принцип взаимности для таких систем не применим. Распространение звука в толще вод океана имеет волноводный характер. Отражение от дна и поверхности океана и вертикальная рефракция звука, обусловленная нелинейным распределением скорости звука по вертикали (подводный звуковой канал – ПЗК) создают своего рода «геометрический резонанс». Условия применимости принципа взаимности для волноводного распространения звука и доказательства некоторых теорем приведены в [1].

Морскую среду во многих задачах можно аппроксимировать плоско-слоистой моделью, в которой распространение звука описывается линейными акустическими уравнениями. Для плоско-слоистой стационарной среды с мягкими, твердыми или импедансными горизонтальными границами теорема взаимности выполняется при следующих условиях. Приемник и излучатель расположены на одном горизонте, а профили $k(z)$, $\rho(z)$ совпадают в точках приема и излучения. Влияние горизонтальных течений учитывается в теоремах обращения потока. В этом случае звуковое давление, деленное на величину β , зависящую от скорости течения на горизонте приемника, остается инвариантным относительно перестановки источника и приемника, если одновременно изменить на обратные направления собственных векторов спектрального разложения исходного поля и вектора скорости течения. Соотношения взаимности для движущейся среды справедливо относительно звукового давления с фазовой коррекцией [1]. Краткий обзор теорем взаимности для систем с выделенным направлением распространения звука для временной и частотной областей приведен в [2].

В реальном океане неоднородности среды различных пространственно-временных масштабов возмущают плоско-слоистую стратификацию вод, изменяя спектральный состав звукового поля и ограничивая применимость принципа взаимности. Возможны следующие нарушения условий применимости принципа взаимности и, следовательно, инвариантности давления звука относительно перестановки источник-приемник.

1) В экспериментах используется движущийся источник, либо значительно движение самой среды (течения, вихри). Скорость звука в точке излучения изменяется на величину относительной скорости движения источника и среды [3]. Соответственно изменяются уровень звукового давления и доля акустической энергии, распространяющейся в заданном направлении. Можно полагать, что изменение направления относительного движения является причиной асимметричности уровня звука при буксировке излучателя по траверзу приемника. Как правило, в экспериментах точно фиксируется скорость движения излучающего судна, но нет контроля за изменением скорости движения воды.

2) Различие глубин расположения источника и приемника. При неизменности профилей $\kappa(z)$ излучение с разных глубин приводит к перестройке структуры звукового поля. Изменяются не только угол «захвата» лучей, распространяющихся в водной толще, и величина плотности звуковой энергии в точке излучения, но и распределение звуковой энергии по глубине.

3) Изменение характеристик среды вдоль трассы. Даже при небольших горизонтальных градиентах скорости звука, когда распространение звука описывается решениями уравнения Гельмгольца, нарушаются условия применимости принципа взаимности. Необходимы либо коррекция уровня при расчетах волнового поля, сформированного неподвижным источником, либо коррекция методики расчетов (согласование набора решений для разных положений источника).

4) В случае мелкого моря, когда влияние дна существенно, при расчетах необходим учет взаимодействия спектральных компонент поля в случае малых углов наклона дна. Принцип взаимности не применим из-за отклонения дна от горизонтали.

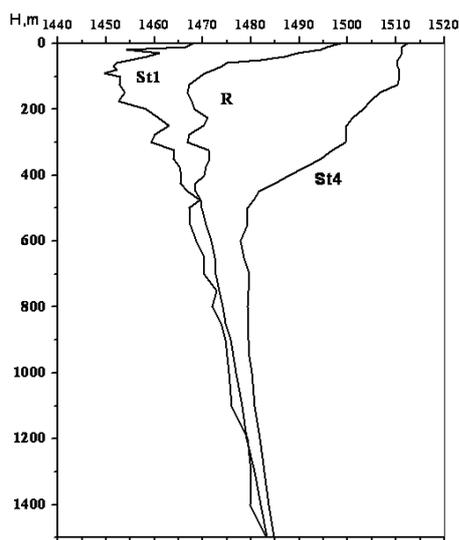


Рис. 1. Вертикальные профили $C(z)$ на станциях S1, S2, R

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные в районе теплого антициклонического вихря Курошио в 1988 г. Исследования проводились под руководством Акуличева В.А. [3] и достаточно подробно были описаны, например, в [4,5].

На станциях S1, S4 при непрерывном спуске излучателя со 100 до 800 м излучались сигналы с частотами 348 Гц и 696 Гц. Прием звуковых сигналов производился в точке R, расположенной вне вихря в водах субарктической структуры. Трасса S1-R находилась вне вихря, а трасса S4-R начиналась из центра вихря. Вертикальные профили скорости звука на станциях S1, S2, R представлены на рис. 1. Изменение уровня сигналов с частотой 348 Гц на горизонтах 100, 250, 500 и 1000 м при непрерывном спуске излучателя в точке S1 показано на рис. 2. Трассу S1-R можно считать квазиоднородной, различия профилей $C(z)$ проявляются только до

глубин 300 м. На трассе S4-R (рис. 3) источник и приемник находятся в существенно различных средах. Значения средних уровней сигналов при расположении источника и приемника на характерных горизонтах 100, 250, 500 и 1000 м приведены в таблице на рис. 4. ПЗК в точке приема выражен слабо, расположен на глубинах 0-600 м. На трассе S1-R

значения среднего уровня сигналов мало различаются на всех горизонтах и почти не изменяются при погружении излучателя. Отметим изменение интерференционной структуры сигналов при заглублении источника и выходе его из области ПЗК.

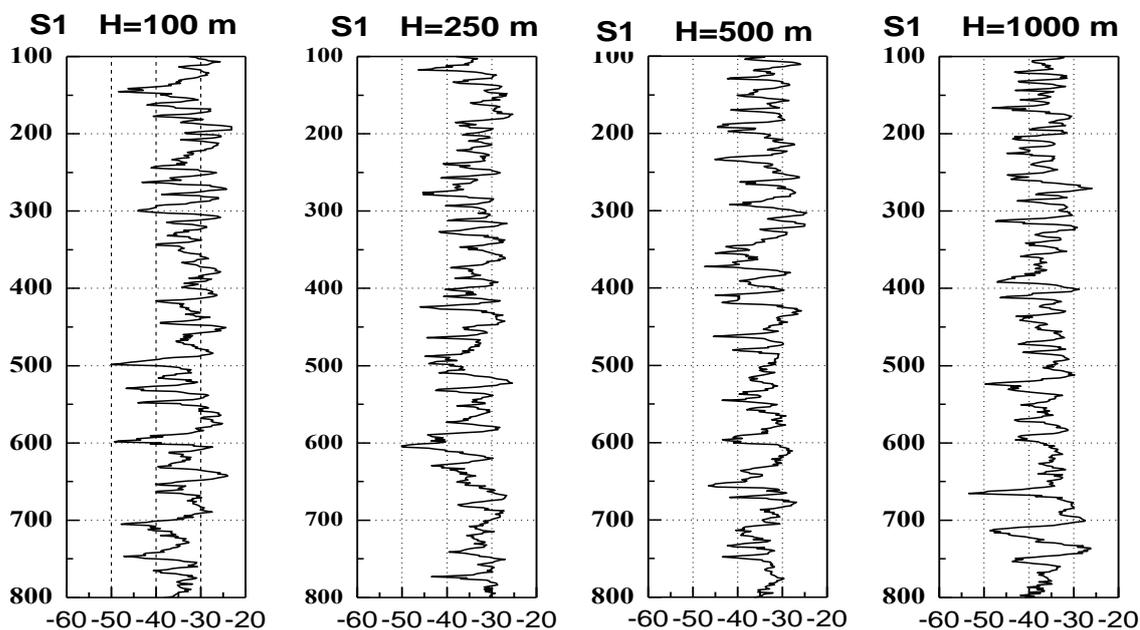


Рис. 2. Уровень сигналов с частотой 348 Гц, излученных на станции S1.
Горизонты приема: 100, 250, 500 и 1000 м

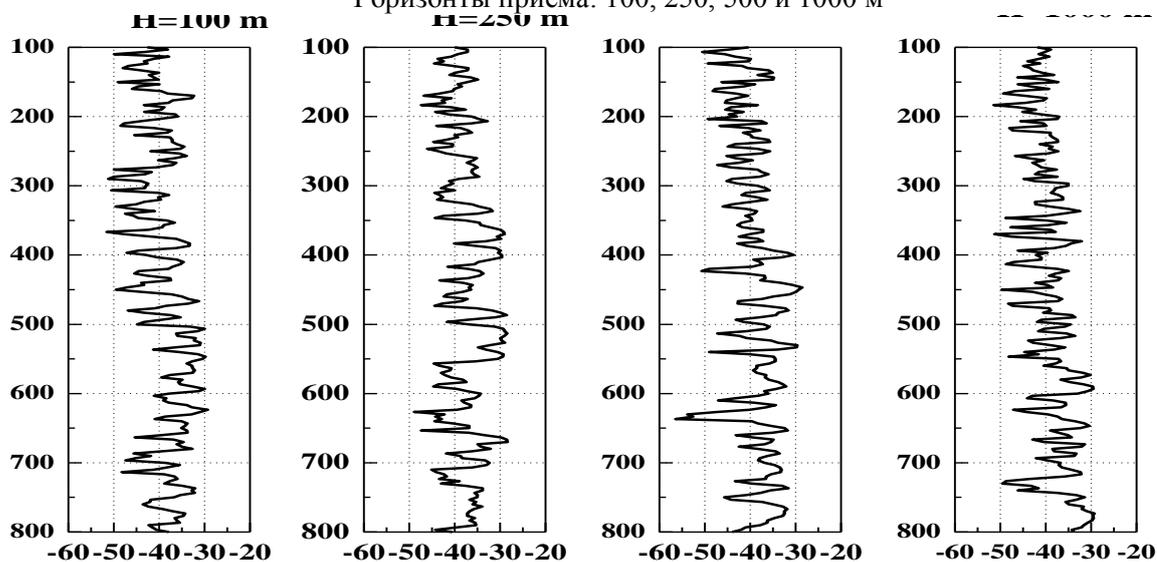


Рис. 3. Уровень сигналов с частотой 348 Гц, излученных на станции S4.
Горизонты приема: 100, 250, 500 и 1000 м

Заглубление источника также приводит к снижению уровня сигналов, принятых на горизонте 100 м и повышению при этом уровня сигналов на горизонте приема 1000 м. В данном случае нарушение условий применимости принципа взаимности (несоответствие

горизонтов приема и излучения) не приводит к значительным различиям в уровнях принятых сигналов. Разность $P_{ij}-P_{ji}$, $i,j=1,2,3,4$ не превышает 4 дБ (таблица 1).

На трассе S4-R при излучении сигналов с горизонтов 100 м и 250 м, где значения $C(z)$ на 40 м/с больше, чем в точке S1, уровни принятых сигналов примерно на 10 дБ ниже, чем на трассе S1-R. При заглублении излучателя и приближении его к оси ПЗК, где $C(z)$ уменьшается на 30 м/с, уровень сигналов возрастает в среднем на 7-10 дБ на всех горизонтах приема и достигает значений, наблюдавшихся на трассе S1-R. Разность $P_{ij}-P_{ji}$, $i,j=1,2,3,4$ достигает 8 дБ для $i,j=2,3$. Столь значительное изменение уровня сигналов при перестановке источник – приемник вызвано существенным различием профилей $k(z)$.

Таблица 1. Средние уровни сигналов на трассах S1-R, S4-R, частота 348 Гц

Излучатель \ Приемник	S1-R				S4-R			
	100	250	500	800	100	250	500	800
100	-30	-32	-35	-34	-43	-38	-32	-37
250	-33	-32	-34	-30	-40	-40	-32	-35
500	-31	-30	-32	-32	-40	-40	-35	-33
1000	-36	-34	-32	-33	-41	-42	-35	-32

Кроме экспериментов по вертикальному зондированию вихря, были проведены исследования распространения звука при буксировке излучателя на глубине 100 м вдоль трасс, пересекающей вихрь (трассы A2 и B [4,5]). На трассе A2 приемная система располагалась в центре вихря, вблизи точки S4, заканчивалась трасса в точке S1. Трасса B была почти зеркальным отражением трассы A2: начиналась трасса вблизи точки S4, а заканчивалась вблизи точки R. Гидрологические условия и вертикальные распределения скорости звука в точках S1 и R близки друг другу. Длины трасс также почти совпадают и равны примерно 430 км. С большой степенью точности можно считать, что на трассах A2 и B выполнена перестановка источника и приемника для одних и тех же значений параметров среды. Результаты эксперимента показывают, что средний уровень сигналов, излученных вне вихря и принятых в центре вихря почти на 10 дБ выше, чем уровень сигналов, зарегистрированных при перестановке излучателя и приемника. Качественное объяснение нарушения принципа взаимности можно дать, вычислив спектральный состав звукового поля при излучении сигналов с одной глубины, но при разных значениях скорости звука в излучателе и разных структурах ПЗК. Скорость звука в излучателе составляла в точке R4 1500 м/с, а в точках S1 и R примерно 1465 м/с. Изменение уровня сигналов с частотой 232 Гц вдоль трасс A и B показано на рис. 5.

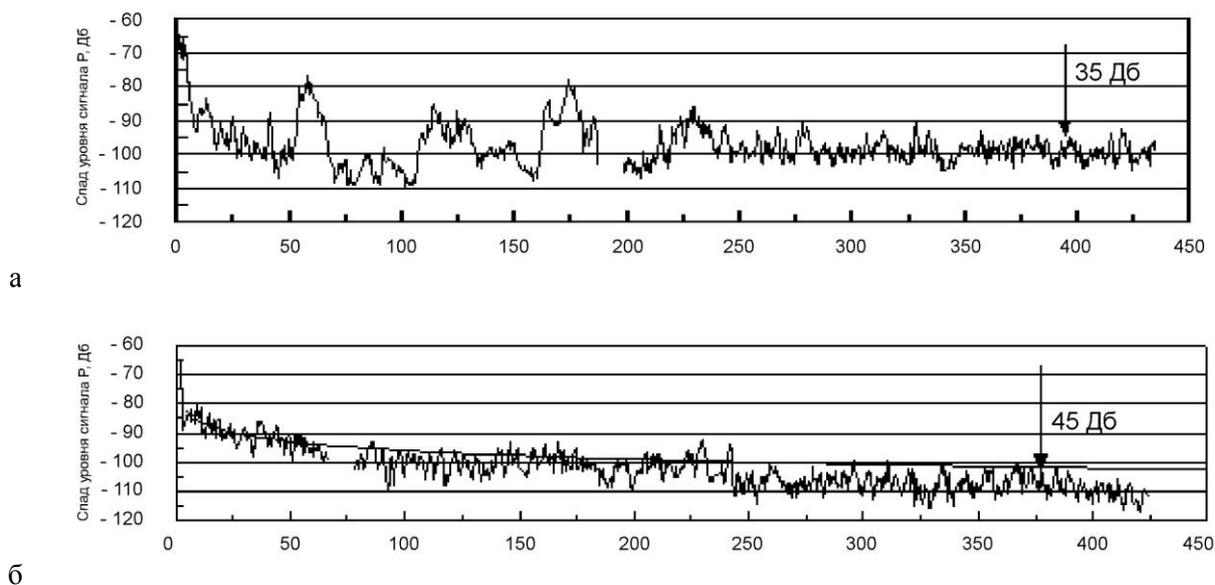


Рис. 5. Изменение уровня сигналов с частотой 232 Гц вдоль трасс: а) А-приемник в центре вихря; б) В-приемник вне вихря

Таким образом, нарушение условий применимости принципа взаимности может приводить к значительным изменениям звукового давления принятых сигналов при перестановке приемник – источник. Величина изменения давления зависит от условий

эксперимента и может достигать 10 дБ в областях сильной неоднородности среды, либо при существенной разнице горизонтов приема и излучения. Для оценки результатов экспериментов, выполненных с использованием движущегося источника, когда изменяются условия излучения вдоль трассы и существует относительное движение источника и среды, необходима специальная методика проведения теоретических расчетов, даже при условии применимости решений уравнения Гельмгольца. Наиболее простой, но и наиболее длительный метод проведения расчетов состоит в выполнении большого количества вычислений звукового поля вдоль трассы для различных последовательных положений источника при одном и том же положении приемника. Полученные распределения звукового поля в точке приемника накапливаются в одном файле и в итоге представляется график зависимости значений уровня сигналов от положения источника вдоль трассы.

Литература

1. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. – М.: Наука, 1989. – 214 с.
2. Wapenaar С.Р.А. Reciprocity theorems for two-way and one-way vectors: A comparison // J.Acoust. Soc. Amer. 1996. Vol.100, №6. P. 3508-3518.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
4. Акустические и гидрофизические исследования в северо-западной части Тихого океана: отчет об экспедиционных работах в 12 рейсе НИС «Академик А. Виноградов» / ТОИ ДВО АН СССР. – Владивосток, 1988. – Т.1. – 401 с.
5. Акуличев В.А., Дюльдина Н.И., Моргунов Ю.Н., Соловьев А.А., Шеховцов Д.Н. Влияние теплого антициклонического вихря фронтального раздела Куроиси на структуру звукового поля // Морские технологии: сб. ст. Владивосток: Дальнаука, 1996. С. 130-147.

ВЫСОКОНАПРАВЛЕННАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ИЗЛУЧАЮЩАЯ АНТЕННА

И.В. Корсков, П.Н. Попов

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел./факс: (423) 2312573,
e-mail: popov_pn@poi.dvo.ru

Для задач акустического мониторинга мелкомасштабных неоднородностей морской воды необходимо применение акустических излучателей, сочетающих противоречивые свойства: широкополосность и высокую направленность в широкой полосе частот. Такими уникальными свойствами обладают нелинейные параметрические излучатели. В работе обсуждается возможность применения многоэлементной высокочастотной акустической излучающей антенны для реализации параметрического нелинейного взаимодействия в широкой полосе разностных частот. Антенна состоит из 56 пьезокерамических элементов с диаметром 45 мм толщиной 6 мм. Общий размер 1240×440 мм. Рабочие разностные частоты располагаются в интервале частот от 20 до 50-60 кГц. Направленность излучения (менее 1°) сохраняется на разностных частотах. В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик антенны. Обсуждается применение антенны для задач акустической спектроскопии мелкомасштабных неоднородностей морской воды.

Для выполнения задач мониторинга мелкомасштабных неоднородностей в деятельном слое моря были исследованы возможности применения параметрических пьезоэлектрических преобразователей [1]. В качестве простейшего параметрического излучателя использовался излучатель с рабочей частотой 150 кГц, на который подавались бигармонические сигналы двух близких частот [2]. Процесс излучения и обратного рассеяния контролировался приемными гидрофонами. В морской воде в результате нелинейного взаимодействия звуковых волн генерировались разностные частоты в диапазоне 4-40 кГц. На рис. 1, а показан комплекс для измерения обратного рассеяния звука на разностных частотах 4-40 кГц при частотах накачки около 150 кГц, на рис. 1, б показана экспериментально измеренная диаграмма направленности на этих частотах.

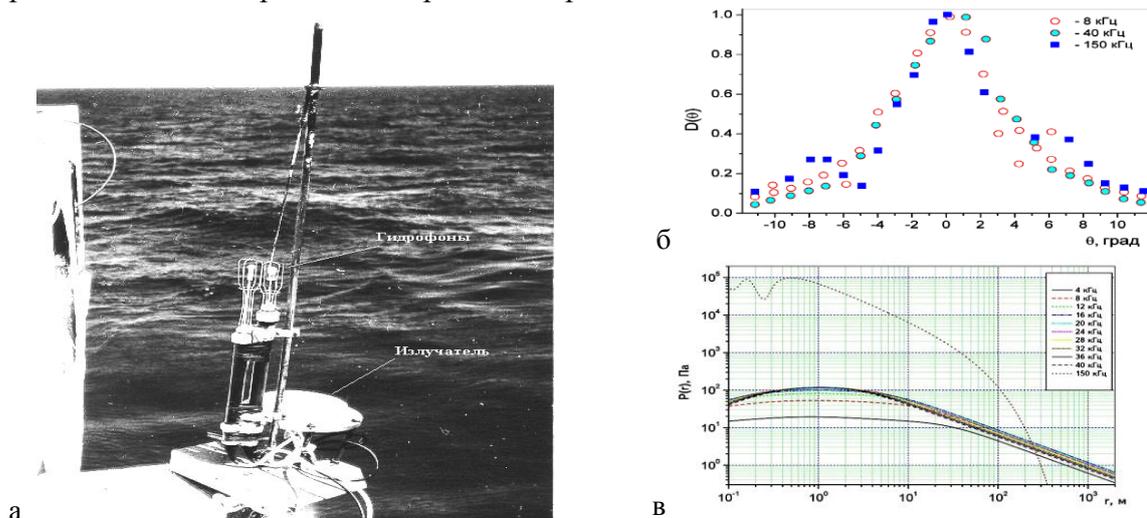


Рис. 1. Комплекс для измерения обратного рассеяния звука на разностных частотах 4-40 кГц (а) при частотах накачки около 150 кГц и диаграмма направленности на этих частотах (б), расчетная зависимость амплитуды давления генерируемых волн разностной частоты и накачки от расстояния от излучателя (в)

На рис. 1, в показана расчетная зависимость амплитуды давления генерируемых волн разностной частоты и накачки от расстояния до излучателя [3]. Из приведенных графиков видно, что на разностных частотах сохраняется высокая направленность излучения и малое затухание звука, что позволяет использовать излучатель для задач мониторинга мелкомасштабных неоднородностей в море.

В развитие описанного комплекса была подготовлена высоконаправленная акустическая излучающая антенна, позволяющая реализовать параметрическое нелинейное взаимодействие в широкой полосе разностных частот. Антенна состоит из 56 элементов. Каждый элемент выполнен в виде круглого поршня диаметром 45 мм и толщиной 6 мм. Все элементы вмонтированы в пластину, изготовленную из алюминия, размером 1240 мм × 440 мм. Элементы расположены в узлах прямоугольной решетки: 4 элемента по вертикали и 14 элементов по горизонтали. Расстояние между центрами соседних элементов 75 мм. Все элементы электрически объединены в 4 отдельные группы, каждая группа состоит из 14 соединенных параллельно между собой элементов. Общий вид антенны и расположение отдельных групп представлено на рис. 2. Элементы каждой из 4-х групп чередуются как по вертикали, так и по горизонтали. Данное расположение групп дает возможность изменять характеристику направленности антенны, появляется возможность излучения сигналов различных частот отдельными группами для формирования многочастотного излучения. При таком построении можно использовать двухканальный метод излучения, который исключает взаимодействие исходных частот в электронном тракте, приводит к сужению основного лепестка диаграммы направленности, увеличению числа и амплитуды боковых лепестков. Появляется возможность независимой регулировки амплитуды и частоты в каждом канале в отдельности, формировать сложные сигналы.

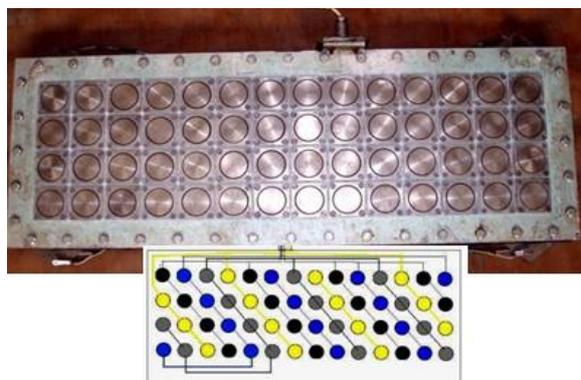


Рис. 2. Общий вид многоэлементной антенны и расположение отдельных групп, помеченные различным цветом

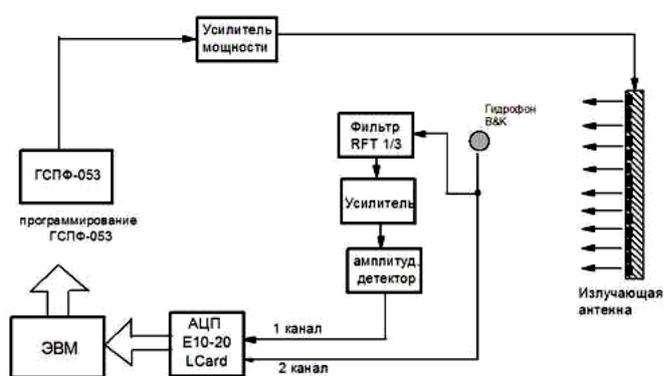


Рис. 3. Схема эксперимента на МЭС Шульца

В лабораторных условиях были исследование амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), импеданс отдельных элементов антенны, натурные испытания всей системы в режиме, когда все четыре группы соединены между собой параллельно проводились на гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН. Измерения проводились с пирса на МЭС Шульца. Схема эксперимента представлена на рис. 3. Прием сигнала осуществлялся широкополосным гидрофоном фирмы V&K типа 8103. АЧХ антенны измерялась в диапазоне 60-500 кГц. Антенна обладает рядом резонансов в пределах от 100 до 470 кГц. Наибольший максимум располагается вблизи 450 кГц.

На рис. 4 представлена амплитудно-частотная характеристика антенны при работе в параметрическом режиме. На антенну подавался бигармонический сигнал с частотами 425 и 457 кГц (а) для формирования разностной частоты ~32 кГц (б).

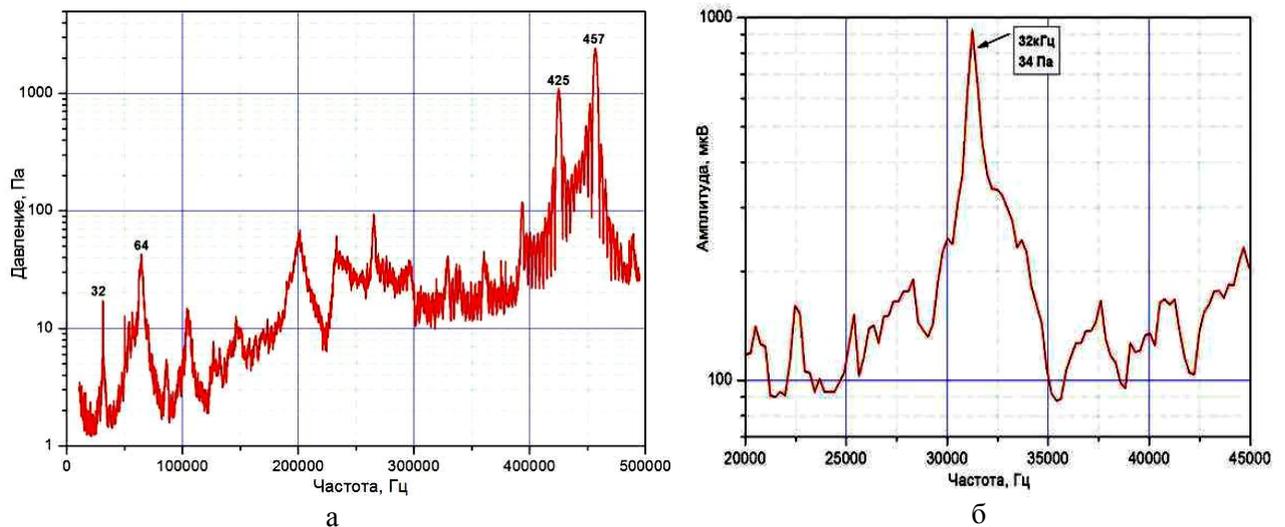


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика параметрической антенны с накачкой 425 и 457 кГц (а) и разностной частотой 32 кГц (б)

Процесс генерации волн разностной частоты был исследован непосредственно путем перемещения гидрофона вдоль оси излучения антенны при излучении бигармонических сигналов с частотами 190 и 210 кГц (разностная частота 20 кГц) и 193,5 и 207,5 кГц (разностная частота 15 кГц) с борта НИС «Малахит» в бухте Витязь. Зависимость амплитуды звукового давления волн разностной частоты от расстояния между излучателем и гидрофоном показана на рис. 6, а. Структура осевого распределения поля параметрического излучателя на различных разностных частотах показана на рис. 5, б.

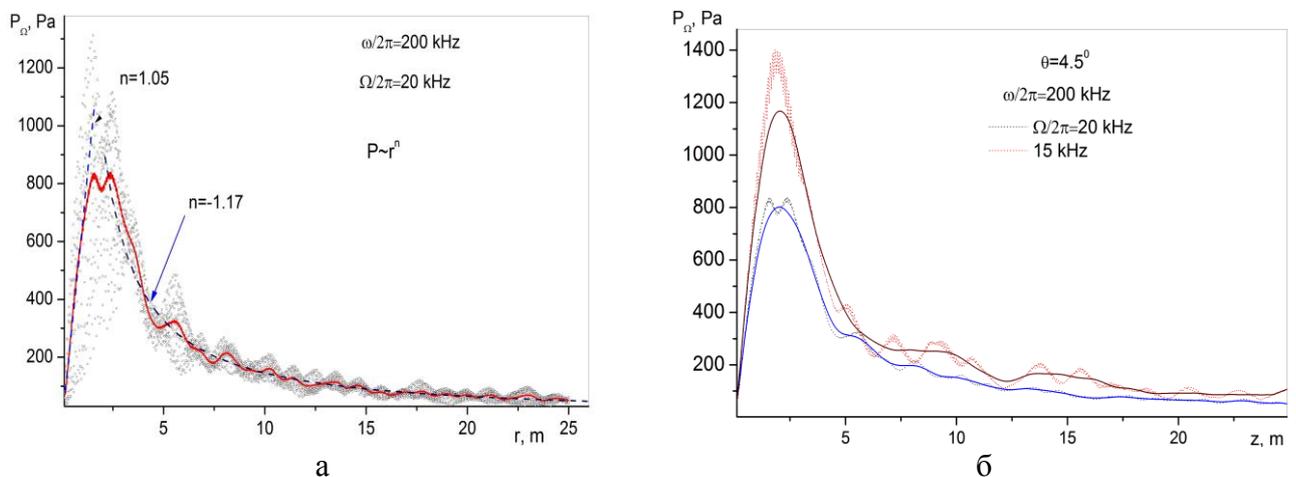


Рис. 5. Зависимость амплитуды звукового давления волн разностной частоты от расстояния между излучателем и гидрофоном (а). Структура осевого распределения поля параметрического излучателя на различных разностных частотах (б)

Для иллюстрации применения нелинейного метода зондирования морской среды на рис. 6 представлены результаты по рассеянию звука в б. Витязь на частотах 64 и 457 кГц. Излучатель располагался на глубине 30 см от поверхности и был ориентирован плоскостью излучения вертикально вниз.

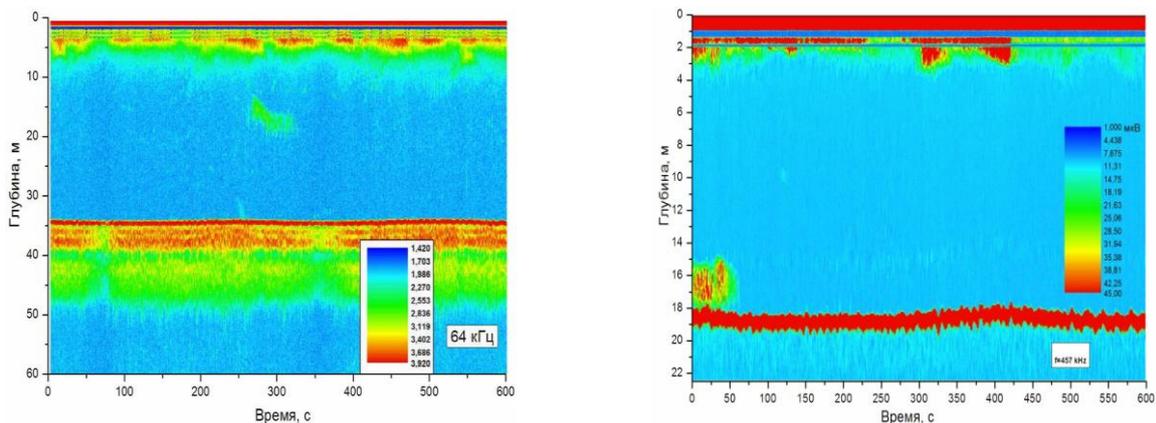


Рис. 6. Рассеяние звука на частотах 64 и 457 кГц, полученное в июле 2009 г. при дрейфе судна в б. Витязь Японского моря

На рис. 6 видно рассеяние звука на разностной частоте 64 кГц в верхнем слое до глубины около 10 м, а также неоднородность, располагающаяся на глубине 20 м. Следует обратить внимание также на проникновение излучения в толщу донных осадков, которое по предварительным оценкам составляет около 5-10 метров.

На рис. 7 приводятся результаты обратного рассеяния звука при зондировании водной толщи на частотах 200, 450 кГц при ориентации плоскости излучения вдоль поверхности моря.

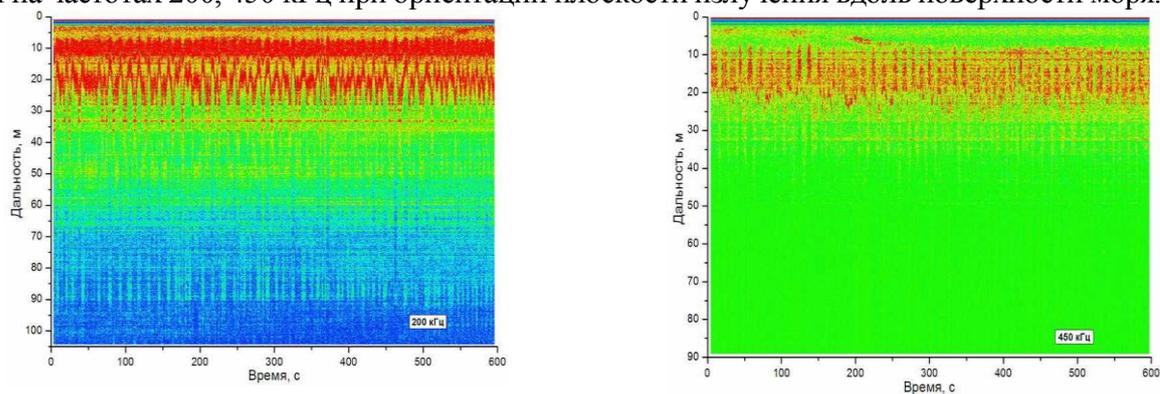


Рис. 7. Обратное рассеяние звука при зондировании водной толщи на частотах 200 и 450 кГц при ориентации плоскости излучения вдоль поверхности моря

На рис. 7 видно многократное отражение от поверхности моря и дна на большом расстоянии от излучателя. В среднем дальность активной гидролокации зависит от частоты излучения и на частотах до 200 кГц достигает порядка 100 м.

Представленные результаты показывают возможность применения многоэлементной высокочастотной акустической излучающей антенны в целях реализации параметрического нелинейного взаимодействия в широкой полосе разностных частот для задач акустической спектроскопии мелкомасштабных неоднородностей морской воды.

Работа выполнялась в рамках проекта РФФИ № 09-02-01030

Литература

1. Новиков Б.К., Тимошенко В.И. Параметрические антенны в гидроакустике. – Л.: Судостроение, 1990.
2. Акуличев В.А., Буланов В.А., Кленин С.А. // Акустический журн. 1986. Т.32. Вып. 3. С. 289.
3. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронезоднородных жидкостей. – Владивосток: Дальнаука, 2001.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ КАЛИБРОВКА КАНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «АСПОСИТ»

О.С. Громашева, К.В. Бачинский, В.А. Юхновский

Государственное учреждение
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел./факс: (423) 2312573,
e-mail: gromasheva@poi.dvo.ru

В работе рассмотрены теоретические аспекты и проблемы практической реализации относительной взаимной калибровки приемных каналов измерительной акустической системы «АСПОСИТ» с применением поля радиогидроакустических буев. Калибровку отдельных компонент системы необходимо производить при модернизации и подготовке к установке измерительной системы. В работе представлены результаты исследований характеристик приемно-передающего тракта излучатель-гидрофон РГБ, выполненных в лабораторных условиях, в условиях, приближенных к натурным (мелкое море), а также на морском гидрофизическом полигоне «М. Шульца» в шельфовой зоне Японского моря.

Для систематических измерений на стационарных и квазистационарных трассах используется специальная гидроакустическая система АСПОСИТ, выполненная на основе группы дрейфующих радиогидроакустических буев (РГБ). Информация, полученная синхронно от нескольких буев, позволяет оценивать и пространственные характеристики акустического поля.

Система «АСПОСИТ» состоит из двух взаимодействующих подсистем (излучающей и приемной). Приемная подсистема выполняет функцию радиогидроакустического ретранслятора (ответчика) и конструктивно представляет собой приемные РГБ. Излучающая подсистема включает в себя формирователь зондирующих сигналов и усилитель мощности с излучателем гидроакустических сигналов.

Разработанная система может работать параллельно в двух режимах – в режиме регистрации прямых зондирующих сигналов и режиме позиционирования. Рабочие режимы разнесены в частотном диапазоне, причем для позиционирования выбран значительно более высокий диапазон частот. Принцип действия системы в режиме позиционирования основан на измерении интервала времени распространения звуковых волн (сигналов запроса) в морской среде от излучающего буя до приемного буя с последующим пересчетом в дистанцию.

Для исследования акустических трасс на этапе подготовки экспериментов необходимо проводить калибровочные испытания для настройки диапазонов частот и уровней мощности приема для каждого из используемых гидрофонов РГБ. При решении сложных специализированных томографических задач возникает необходимость в предварительной оценке параметров сигналов, принятых гидрофонами высокочастотных буев. Отдельной задачей является калибровка отдельных компонент системы при модернизации и подготовке к установке измерительной системы с применением поля радиогидроакустических буев.

При проведении калибровочных измерений необходимо производить излучение и прием сигналов на различных частотах. В работе представлены результаты исследований характеристик приемно-передающего тракта излучатель-гидрофон, выполненных в лабораторных условиях (бассейн) и в условиях, приближенных к натурным (мелкое море).

Полученные данные можно анализировать только тогда, когда есть уверенность в достоверности проведенных измерений. При проведении экспериментов по акустической томографии необходимо знать:

- уровни зондирующих сигналов;
- сквозные характеристики приемных систем;
- динамический и частотный диапазон приемных систем;
- уровень помех приемных систем во всем частотном диапазоне.

Получение этих характеристик является не менее сложной задачей, чем проведение самих измерений.

При подготовке системы к установке, а также при модернизации системы необходимо производить калибровку отдельных компонент гидроакустической системы, исследование характеристик приемно-передающего тракта излучатель-гидрофон. Калибровка может выполняться:

- в лабораторных условиях (бассейн);
- в условиях, приближенных к натурным (мелкое море).

На первом этапе было проведено исследование характеристик приемно-передающего тракта излучатель-гидрофон в лабораторных условиях [1].

Эксперименты по относительной калибровке гидрофонов буев в мелком море проводились как в 2010 г., так и в 2011 г. на морском гидрофизическом полигоне «Мыс Шульца».

При проведении измерений использовался диапазон частот от 1 до 8 кГц, поэтому для получения относительной сквозной характеристики всего приемного тракта системы (гидрофон – РГБ – приемник – АЦП) на всех рабочих частотах.

Наиболее рациональным решением было размещение гидрофонов всех буев в одной точке. Излучение проводилось непрерывными тональными сигналами на расстоянии 5 м. К проверке были подготовлены 10 буев. Одновременно выставлялось 7 буев (по числу каналов).

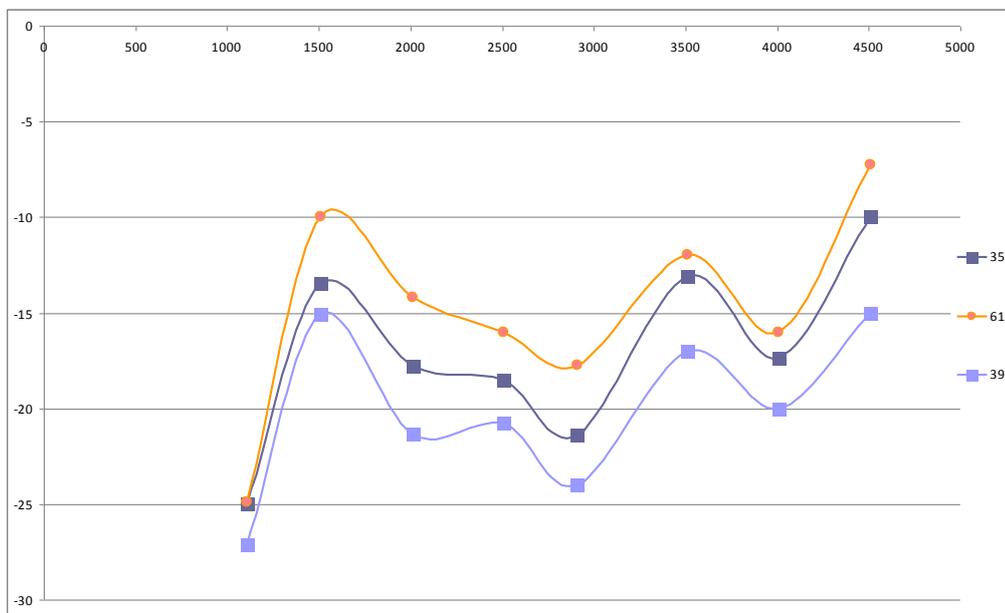


Рис. 1. АЧХ приемно-передающего тракта системы «АСПОСИТ»

На рис. 1 приведен фрагмент амплитудно-частотной характеристики для трех разных РГБ. Наличие выраженных максимумов и минимумов вызвано интерференционными помехами [2].

Эксперименты по исследованию характеристик приемно-передающего тракта излучатель-гидрофон необходимо проводить при подготовке каждого этапа проведения томографических измерений, поскольку для корректной обработки данных и численного моделирования необходимо знать относительные коэффициенты усиления для каждого тракта на всех рабочих частотах.

Следующим этапом подготовительных измерений была градуировка излучателя. Для устранения интерференционных эффектов, вызываемых отражениями, стоячими волнами и электрическими наводками, был применен импульсный режим.

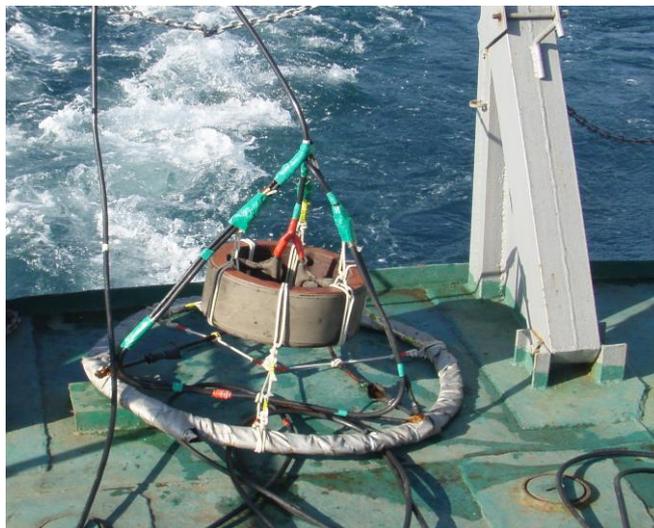


Рис. 2. Пьезоэлектрический излучатель

Эксперимент проводился в открытом море в точке с глубиной 40 м. Для градуировки пьезоэлектрического излучателя (сегментированного цилиндрического преобразователя) использовался калиброванный гидрофон с известной чувствительностью 3 мВ/Па.



Рис. 3. Калиброванный гидрофон с известной чувствительностью 3 мВ/Па

Заглубление гидрофона и излучателя составляло 20 м, расстояние между ними – 5 м. Акустический сигнал измеряется только в тот короткий интервал времени, когда на гидрофон воздействует прямой импульс от излучателя (~ 30 мс). Схема размещения преобразователей приведена на рис. 4.

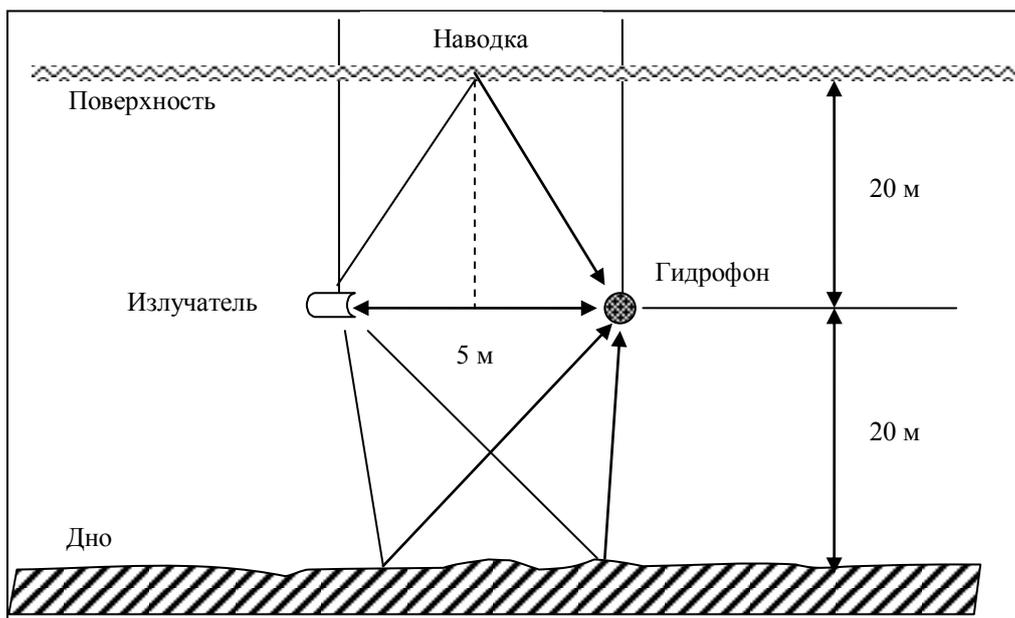


Рис. 4. Схема размещения преобразователей при проведении градуировки

Очевидно, что при $\Delta l = 40$ м, $\Delta \tau = 40/1500 \approx 30$ мс. Таким образом, отраженные от поверхности и дна сигналы приходили примерно через 30 миллисекунд.

С другой стороны, для достижения установившегося режима требуется достаточно большая длительность импульса. Кроме того, можно определить конечный интервал времени, необходимый для того, чтобы амплитуда импульса приняла значение, при котором система будет колебаться при непрерывном возбуждении. При обработке полученных данных также оценивалось количество периодов, определяющих длительность переходного процесса.

Особенностью импульсного режима градуировки является отсутствие верхней граничной частоты. Но на нижних частотах этот предел существует. При заданной геометрии расположения излучателя и приемного гидрофона в границах поверхность-дно для осуществления импульсного режима определен низкочастотный предел, который может меняться от 500 до 5000 Гц.

Импульсного режима градуировки имеет свои трудности. Главная из них заключается в том, что импульсный сигнал содержит не одну основную, или несущую, частоту, а спектр частот. Спектр импульса зависит от следующих факторов:

- основная, или несущая, частота;
- форма импульса;
- длительность импульса;
- частота повторения импульсов;
- фронты импульса.

Кроме того, преобразователи и некоторые электронные устройства могут не всегда обеспечивают высокое качество воспроизведения сигнала.

На рис. 5 представлена АЧХ излучателя, измеренная двумя различными способами. Линия с треугольными маркерами представляет собой результат градуировки при непрерывном излучении гармонического сигнала. Линия, отмеченная ромбами, показывает результат градуировки импульсами, заполненными монохроматическими синусоидальными сигналами.

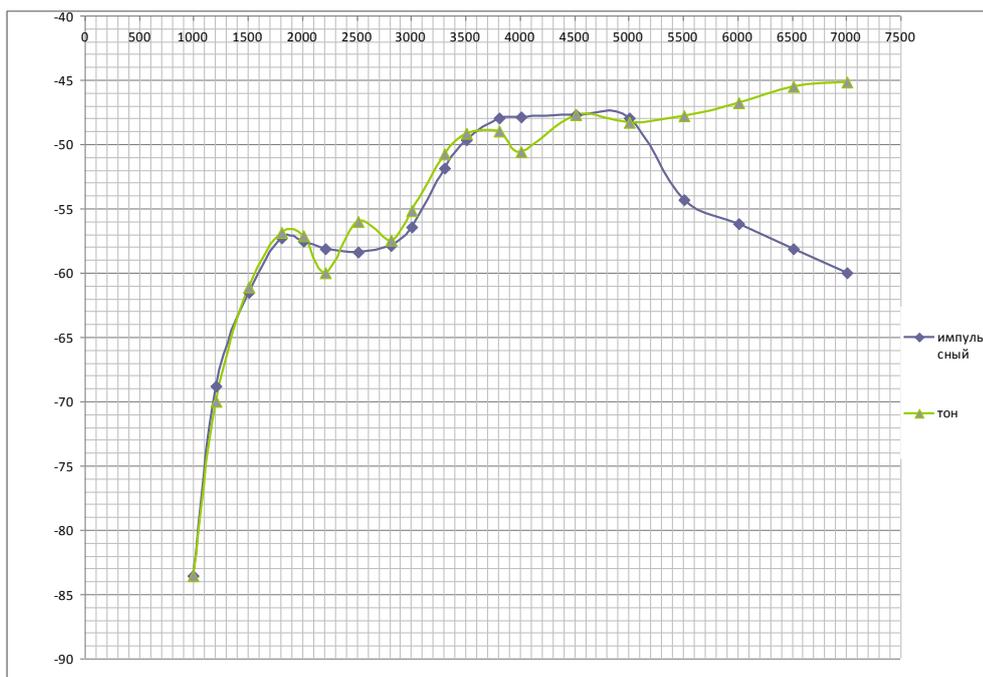


Рис. 5. Градуировка излучателя

Полученные результаты позволили оптимизировать параметры экспериментов, определить диапазон частот для излучения сложных широкополосных сигналов. В настоящее время проводится дополнительный этап исследований, так как калибровка (поверка) измерительных гидрофонов в диапазоне частот от 10 Гц до 8 кГц является важной технически сложной задачей, успешное решение которой обеспечит точность и корректность проведения измерений акустического поля по исследуемым трассам.

Литература

1. Громашева О.С., Кошелева А.В., Юхновский В.А. Испытания и калибровка системы позиционирования гидрофонов РГБ // Сб. тр. XX сессии РАО. Т. 2. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 406-410.
2. Бобер Р.Дж. Гидроакустические измерения / Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 362 с.
3. Громашева О.С., Бачинский К.В. Исследование характеристик приемно-передающего тракта излучатель-гидрофон РГБ // Сб. тр. «Научная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения А.В. Римского-Корсакова». – М.: ГЕОС, 2010. – С. 180-183.
4. Колесников А.Е. Акустические измерения. – Л.: Судостроение, 1983. – С. 356.

О ПОСТРОЕНИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МНОГОДИАПАЗОННЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКЕАНА

Ю.В. Мальцев, С.Е. Прокопчик

Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, тел.: (423) 2515325,
e-mail: halab@ifit.phys.dvgu.ru

На основании разработанной авторами расчетной модели показана возможность создания низкочастотных направленных волноводных гидроакустических излучателей. Приведены результаты численного моделирования основных характеристик широкополосных, а также двух- и трехдиапазонных волноводных излучателей. Представлены результаты экспериментальных исследований практически разработанных конструкций рассматриваемых излучателей.

При решении задач прикладной гидроакустики связанных с изучением дальнего распространения акустических волн в океане в диапазонах частот ниже 1 кГц часто необходимо использовать направленные излучающие антенны и преобразователи. Наиболее известными техническими решениями данной задачи являются многоэлементные вертикальные антенные решетки на основе электромагнитных или электродинамических преобразователей, а также излучатели, составленные из пьезокерамических секционированных колец большого диаметра. Большие масса и габариты таких антенн затрудняют их эксплуатацию и требуют применения судов достаточного водоизмещения, оснащенных спуско-подъемными устройствами соответствующей грузоподъемности.

Альтернативные источники направленного действия низкочастотного звукового диапазона с приемлемыми массогабаритными характеристиками могут быть реализованы на основе волноводных излучателей. Основы теории излучения волноводных структур, погруженных в жидкость, в частности, изложены в [1], а результаты, иллюстрирующие возможности практической реализации направленных излучателей среднего звукового диапазона (1-10 кГц) в [1, 2]. Анализ возможностей разработанной технологии показывает, что оптимизация параметров электроакустических систем возбуждения волноводов, применяемых материалов и новые конструкторские решения позволяют разработать сравнительно малогабаритные направленные излучатели для частотного диапазона 400-1000 Гц, обладающие в указанной полосе несколькими резонансными частотами. Типовой волноводный излучатель с волноводной структурой, типа упругого цилиндра, излучающей простейшие осесимметричные волны в окружающее пространство представляет собой протяженную конструкцию сигарообразной формы (рис. 1, *a*), основным габаритным размером, которой является длина L_g , основную часть при этом составляет длина волновода L_v , а остальное длина прочного корпуса L_k со стержневой пьезоэлектрической системой возбуждения. Продольное осевое излучение формирует осесимметричную характеристику направленности шириной 40-60° с пониженным уровнем бокового излучения (рис. 1, *b*). Исследования направленных свойств показали, что размеры волновода однозначно определяются заданной рабочей частотой, параметрами материала и требованиями, предъявляемыми к характеристике направленности. Радиус цилиндрического волновода рассчитывается исходя из значения частотного параметра x , задающего угол выхода вытекающей волны

$$a = xC_t/\omega, \quad (1)$$

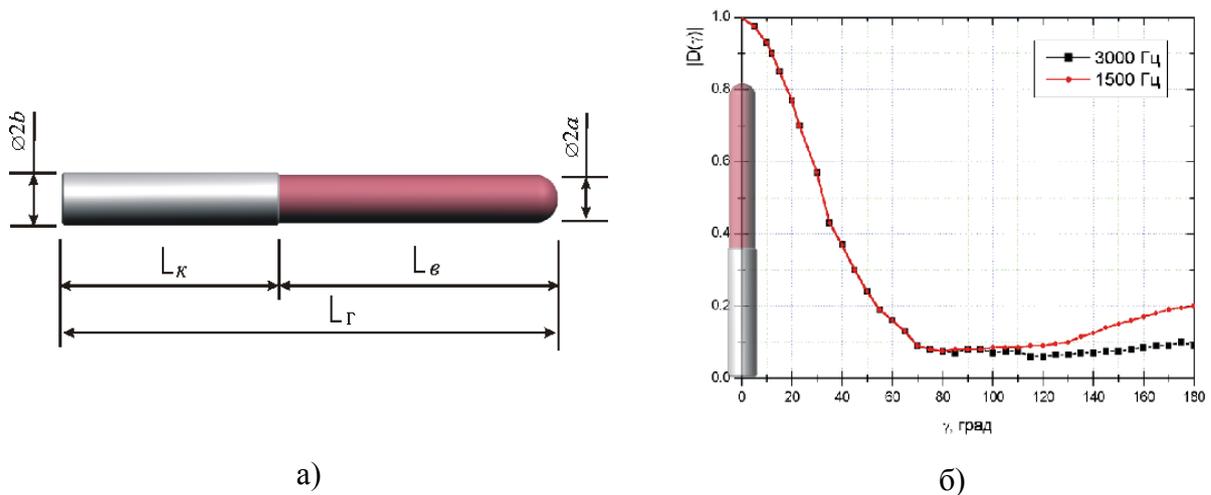


Рис. 1. Волноводный излучатель и его характеристика направленности

где C_t – значение поперечной скорости в материале волновода. Минимальным поперечным размером $2a$ будет обладать излучающая структура из материала с наименьшим значением скорости поперечных волн. Длина волновода зависит от величины коэффициента затухания κ_2 , связанного с излучением в жидкость и заданного уровня тыльного излучения, определяемого уровнем отражения от торца.

$$r_{\xi} = \frac{\dot{\xi}_r(L)}{\dot{\xi}_r(0)} = \frac{\dot{\xi}_r(L)}{\dot{\xi}_0} = \frac{\dot{\xi}_0 e^{-\kappa_2 L}}{\dot{\xi}_0} \text{ откуда } L = -\frac{\ln r_{\xi}}{\kappa_2}, \quad (2)$$

где r_{ξ} – уровень амплитуды колебательной скорости на торце волновода. В качестве материалов для волноводных структур низкочастотных излучателей наиболее подходят акустически мягкие материалы с низкой фазовой скоростью, что позволяет обеспечить наименьшую направленность излучения. Как показывают расчеты для волноводов из различных материалов указанного типа, оптимальные массогабаритные характеристики соответствуют такому значению параметра x для заданной частоты, при которой наблюдается максимум коэффициента затухания κ_2 . Кривые на рис. 2, 3 иллюстрируют зависимость массогабаритных характеристик укороченных волноводов с расчетным уровнем тыльного излучения отраженной от торца волны $r = 0,35$ для рабочей частоты 1,6 кГц. Из приведенных графиков следует, что оптимальная длина волновода соответствует довольно большим значениям его радиуса, при этом следует отметить, что для большинства низкоскоростных материалов максимальные значения коэффициента затухания κ_2 достигаются в диапазоне волновых чисел $x = 3-3,8$. Анализ дисперсионных зависимостей фазовой скорости акустически мягких материалов, приведенный в [1], отмечает значительное увеличение ее значений как раз в этой области, что приводит к увеличению углов выхода нормальной волны с поверхности волновода и существенное расширение характеристики направленности вплоть до ее трансформации в воронкообразную форму. Обеспечение высокой направленности излучения достигается выбором диапазона волновых чисел $x = 0,5-1,5$, что вызывает необходимость принятия компромиссных решений при выборе геометрических размеров волновода. Влияние частотного параметра на характеристику направленности, формируемую волноводом из эбонита излучателя ИПГВ-1,5/3-1Э иллюстрируется рис. 4. Волновод изготовлен из эбонита

и представляет собой мелкослоистую структуру с геометрическими размерами $a = 100$ мм, $L_B = 1000$ мм и эффективным значением поперечной скорости $\tilde{C}_t = 970$ м/с.

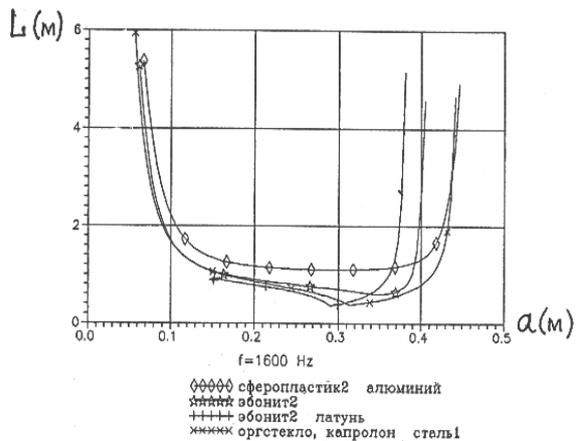


Рис. 2. Зависимость длины от радиуса волновода

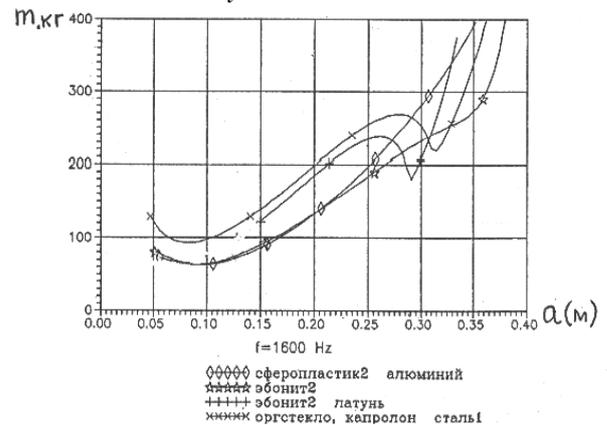


Рис. 3. Зависимость массы от радиуса волновода

Измерения производились в диапазоне частот 1,2-2,1 кГц, что соответствует значениям $x=0,78$ (1,2 кГц), $x=1,02$ (1,58 кГц), $x=1,46$ (2,1 кГц). Волновод рассчитан на рабочую частоту 1,6 кГц с уровнем тыльного излучения на этой частоте $r=0,3$ и для частоты 1,2 кГц является сильно укороченным, поэтому уровень тыльного лепестка имеет значение 0,5. На частоте 2,1 кГц уровень тыльного излучения снижается до 0,2, но при этом начинает искажаться форма основного лепестка диаграммы направленности. Отмеченное искажение обусловлено особенностями дисперсионной характеристики волновода, а именно повышением фазовой скорости нормальной волны, сопровождающимся увеличением угла ее выхода. Область основного лепестка вдоль осевого направления формируется сопутствующей приповерхностной низкоскоростной модой Стоунли-Шелте, особенности проявления которой, изложены в работах [3, 4].

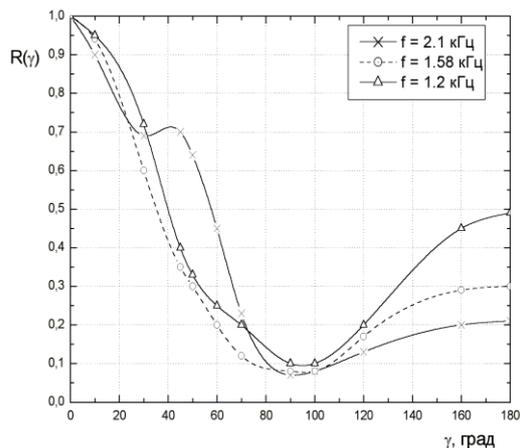


Рис. 4. Зависимость характеристики направленности от волноводного параметра

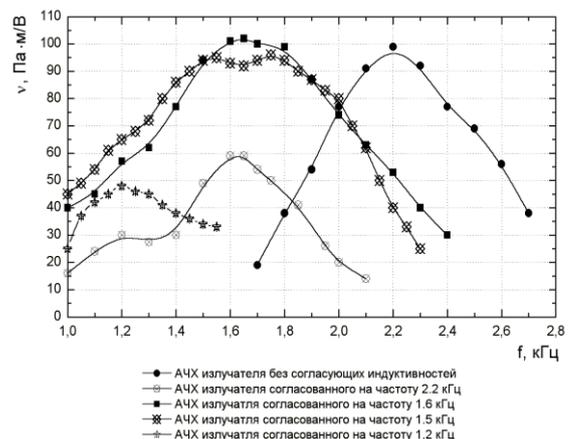


Рис. 5. Эффект низкочастотного резонанса

Отмеченные выше особенности формирования диаграмм направленности следует учитывать при проектировании волноводов для низкочастотных излучателей, особенно, если излучатель является широкополосным или многодиапазонным. Длину волновода необходимо рассчитывать исходя из допустимого уровня тыльного излучения на нижней рабочей частоте диапазона, а диаметр – через значения параметра x по верхней рабочей частоте диапазона.

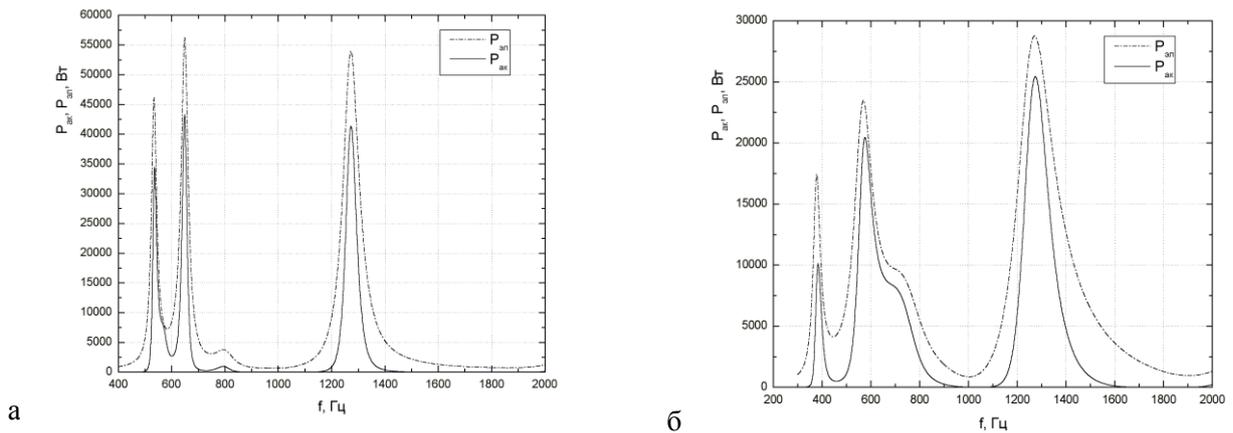


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики мощности излучателей с волноводами из материала: а) ЭДС 7 АП (сферопласт), б) эбонита

Помимо решения задачи формирования характеристики направленности гидроакустического излучателя, и согласования системы возбуждения со средой волноводная структура может оказывать существенное влияние на его амплитудно-частотные характеристики. Одним из свойств волноводной структуры конечной длины является способность изменять реактивную часть входного сопротивления с индуктивного типа на емкостной. Если волновод на частотах ниже основной резонансной частоты системы возбуждения будет иметь реактивное сопротивление индуктивного типа достаточной величины, то им может быть сформирован дополнительный низкочастотный резонанс. Этот эффект подтвержден экспериментально амплитудно-частотной характеристикой излучателя ИПГВ-1,5/3-1Э и иллюстрируется рис. 5, где ниже частоты основного низкочастотного резонанса 1,6 кГц формируется дополнительный резонанс на частоте 1,2 кГц. Дополнительной возможностью влияния на амплитудно-частотную характеристику является применение согласующих электрических цепей, способных усиливать компенсацию сдвига фазы между током и напряжением в цепи преобразователя и тем самым существенно повышать его эффективность в рабочем диапазоне частот. Таким образом, волноводная структура в сочетании с согласующими цепями позволяет обеспечить эффективную работу излучателя ИПГВ-1,5/3-1Э в низкочастотном диапазоне в полосе 1,2-2,5 кГц (рис. 5). Для иллюстрации возможностей построения низкочастотных волноводных излучателей с резонансными частотами существенно ниже 1000 Гц выполнено их численное моделирование. На рис. 6, а, б приведены амплитудно-частотные характеристики мощности излучателей с волноводами из материала ЭДС 7 АП (сферопласт) и эбонита. Излучатели имеют три резонансные частоты, две из которых находятся в диапазоне 400-600 Гц и имеют достаточно высокую эффективность. Габаритные размеры рассмотренных вариантов излучателей составляют: для волновода из эбонита- 3 м, для волновода из сферопласта 4,5 м, диаметры, соответственно 0,4 и 0,6 м, а массы-1000 кг и 660 кг. Разработанные к настоящему времени технологии конструирования волноводных излучателей позволяют значительно оптимизировать их массогабаритные характеристики в основном за счет уменьшения длины корпуса для системы возбуждения, диаметра и длины волновода за счет применения новых композитных материалов, применения менее мощных преобразователей. В результате волноводный излучатель на диапазон частот 450-750 Гц может быть выполнен в габаритных размерах $\varnothing 250 \times 2500$ мм и иметь массу в пределах 200 кг. Излучатели с такими размерами могут быть использованы как стационарных, так и буксируемых системах акустической томографии, гидролокации и связи.

Литература

1. Мальцев Ю.В., Прокопчик С.Е. Гидроакустические волноводные антенны и перспективы их применения в технических средствах исследования океана // Подводные исследования и робототехника. 2010 №2(10). С. 51-71.
2. Мальцев Ю.В., Прокопчик С.Е. Гидроакустические волноводные антенны для систем донного сейсмопрофилирования // Сб. материалов Всеросс. научно-техн. конф. «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана». Новосибирск, изд-во «ВЕДИ», 2010. С. 200-206.
3. Ущиповский В.Г., Прокопчик С.Е. О незатухающей моде продольных нормальных волн в упругом волноводе, погруженном в жидкость // Сб. тр. 46-й Всерос. межвуз. науч.-тех. конф. Владивосток: ТОВВМИ, 2003. Т. 1. С. 221-223.
4. Прокопчик С.Е., Ущиповский В.Г., Мальцев Ю.В., Тагильцев А.А. О влиянии волны Стоунли-Шелте на характеристики направленности цилиндрической волноводной антенны осевого излучения // Сб. тр. XX сессии РАО. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 71.

ЖИДКОСТНАЯ ЛИНЗОВАЯ АНТЕННА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ

П.А. Волков, В.И. Короченцев, А.Г. Абдрашитов

Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, Аксаковский переулок, 3а, тел.: (423) 245-09-82,

КамГТУ, г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: volkk100@mail.ru

Синтез волновых полей является одной из актуальных прикладных задач физики, так как часто возникает необходимость синтеза антенн внутри и вне замкнутых объемов (областей) в океанологии, подводной и подземной связи.

Под волновыми полями понимаются поля, которые с достаточной степенью точности можно описать с помощью волновых уравнений. В настоящей работе рассматриваются акустические поля с гармонической зависимостью от времени.

Практические проблемы, которые могут привести к задачам синтеза фокусирующих систем, состоят в следующем. Требуется сфокусировать звуковое поле в небольшом объеме. При этом надлежит заранее удовлетворять требования по форме и распределению интенсивности в фокальном объеме. Необходимо сконструировать линзу или рефлектор, которые с заданной погрешностью создадут нужное поле вблизи с фокальной областью на поверхности.

Линзовая антенна – антенна, диаграмма направленности которой формируется за счет разности фазовых скоростей распространения акустической волны в воде и в материале линзы.

Под задачами синтеза понимаются задачи конструирования антенн исходя из известных значений создаваемого волнового поля. Существуют следующие типы акустических антенных систем: вибраторные антенны, щелевые антенны, апертурные антенны, непрерывные, дискретные и линзовые системы. Для целей нашего исследования представляют интерес линзовые антенны.

Для рассматриваемой физической модели предложена адекватная ей математическая модель, основанная на методе функций Грина и обобщенных законах отражения и преломления сферических волн от криволинейной границы раздела двух сред. Основные уравнения и расчет линзовой антенны приводятся в работах [1-2]. В данной статье экспериментально исследуются антенны, разработанные методами, приведенными в [3].

Измерения проводились в гидроакустическом бассейне в импульсном режиме с использованием временной селекции прямого и отраженного сигналов. Временная селекция сигналов позволяет регистрировать только прямой сигнал. Для отраженных сигналов, время прихода которых больше, чем по прямому пути, схема закрыта (рис. 1).

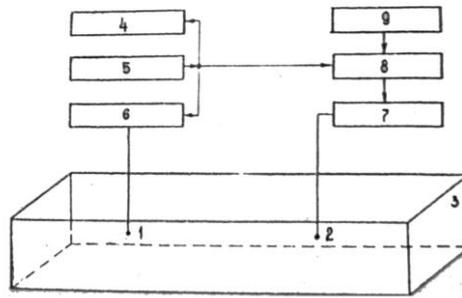


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 – излучатель, 2 – приемник, 3 – измерительный гидроакустический бассейн, 4 – генератор, 5 – импульсный генератор, 6 – усилитель мощности, 7 – временной селектор, 8 – усилитель напряжения, 9 – осциллограф

Технические характеристики излучателя определяются при исследовании акустических свойств измерительного бассейна.

В качестве приемника акустических колебаний используются базы, набранные из пьезокерамики. Применение их диктуется высокой чувствительностью получения различных комбинаций антенны за счет отдельного включения отдельных элементов, имеющих самостоятельный вывод на переключатель типа баз.

При выполнении данной работы рассматривалась сферическая линзовая антенна диаметром 30 см с размещением в ней одиночного излучателя. Излучатель крепится на гибкой подводке, что позволяет менять его положение в антенне. Оболочка изготовлены из резины. Измерения проводились в воде $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды, $C_v = 1500 \text{ м/с}$ – скорость звука в воде. Для наполнителя линзы использовалось машинное масло GS Oil SuperDynamic 15w40 со следующими параметрами $\rho_m = 879 \text{ кг/м}^3$ – плотность масла, $C_m = 1340 \text{ м/с}$ – скорость звука и силиконовый герметик следующими параметрами $\rho_m = 1100 \text{ кг/м}^3$ – плотность масла, $C_m = 1440 \text{ м/с}$ – скорость звука

В качестве одиночного излучателя применялся сферический излучатель рабочей частотой 80 кГц. Снятие характеристик проводилось для трех позиций излучателя внутри сферы.

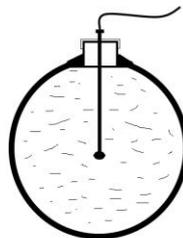


Рис. 2. Конструкция антенны

Антенна представляет собой шар выполненный из резины, заполненный машинным маслом. В центр шара помещался точечный акустический излучатель сферических волн на гибкой подводке. Вся конструкция погружалась в воду в заглушенный бассейн. Антенну поворачивали вокруг оси крепления, с углом поворота 5 градусов. Для каждой фиксированной точки были сняты характеристики излучающего поля.

Эксперимент проводился для трех разных точек расположения излучателя внутри сферической оболочки: 1 точка – в центре сферы, 2 точка – на расстоянии $2/3$ от границы, 3 точка – возле границы. Расстояние между приемником и излучателем составляло 6 м, что соответствует излучению в дальнем поле (рис. 3, 4).

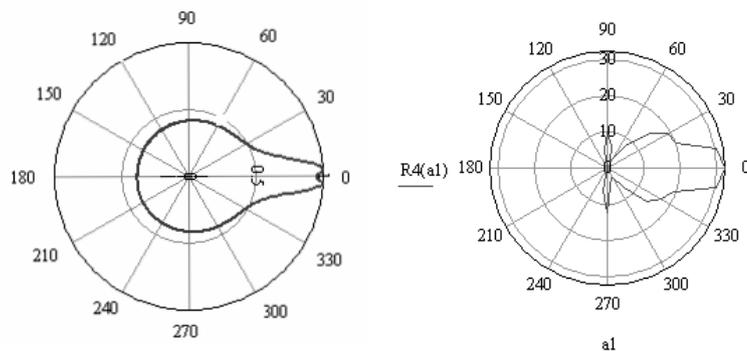


Рис. 3. Диаграмма направленности линзовой антенны. Излучатель находится на расстоянии $2/3$ от центра. Частота излучения 60 кГц: а) диаграмма направленности, полученная в расчетах; б) диаграмма направленности, полученная в эксперименте

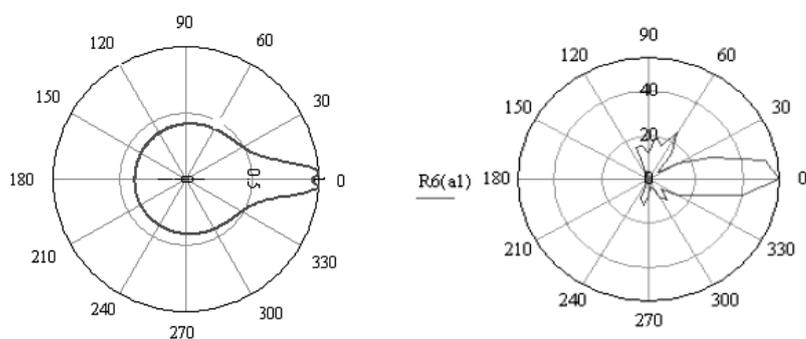


Рис. 4. Диаграмма направленности линзовой антенны. Излучатель находится на расстоянии $2/3$ от центр. Частота излучения 120 кГц: а) диаграмма направленности, полученная в расчетах; б) диаграмма направленности, полученная в эксперименте

В ходе эксперимента было доказано, что при смещении излучателя к границам сферической оболочки, диаграмма направленности сужается, и уменьшаются боковые лепестки, что качественно совпадает с теоретическими методами нахождения поля линзовых антенн. Погрешность измерения в основном лепестке составляет 6%, а в боковых – 30%. В расчетах не учитывались затухание акустических волн в среде и отражение их от границ раздела двух сред.

Литература

1. Короченцев В.И. Волновые задачи теории направленных и фокусирующих антенн. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 192 с.
2. Короченцев В.И. Некоторые возможности метода синтеза антенн в неоднородных средах / В.И. Короченцев, С.А. Шевкун // Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружений и военной техники ВМФ : сборник статей. Специальные вопросы прикладной гидроакустики. – Владивосток: Изд-во ТОВМИ им. С.О. Макарова, 2001. – С. 173–175.
3. Короченцев В.И. Расчет поля точечного излучателя, расположенного в замкнутом объеме / В.И. Короченцев, С.А. Шевкун // Доклады IX научной школы-семинара академика Л.М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XII сессией Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2002. – С. 152–156.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ, НАХОДЯЩЕГОСЯ ВБЛИЗИ ИМПЕДАНСНОГО ГРУНТА

Е.М. Титов, С.А. Шевкун, А.П. Белаш*

Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, Аксаковский переулок, 3а, тел.: (423) 245-09-82,
e-mail: llns@mail.ru

*КамГТУ, г. Петропавловск-Камчатский

При расположении донных маяков гидроакустических навигационных систем вблизи морского дна большое влияние на формируемую характеристику направленности приемо-излучающей системы маяка оказывают акустические свойства грунта. В основном, учет акустических свойств грунта производится приближенными методами.

В данной работе приводится способ расчета поля излучателя, находящегося вблизи импедансной границы раздела вода-грунт, с помощью строгого метода с учетом сферичности волнового фронта.

По предложенной методике проведен расчет поля точечного источника в присутствии грунтов с разными значениями плотности, скорости звука в среде, и построены диаграммы направленности точечного источника, расположенного на различных высотах над границей раздела двух сред.

Использование гидроакустических навигационных систем при эксплуатации автономных необитаемых подводных аппаратов предполагает размещение на дне в районе плавания гидроакустических маяков. При использовании гидроакустических навигационных систем, в основном, используются ненаправленные источники, поэтому предполагается, что характеристика направленности приемоизлучающей системы донных маяков имеет вид верхней полусферы [1].

При расположении точечного источника вблизи морского дна, диаграмма направленности источника искажается из-за влияния импедансной отражающей границы раздела вода-грунт. Поэтому, при неблагоприятной гидрологической обстановке возможна эпизодическая потеря сигналов гидроакустической навигационной системы [2]. В основном, учет влияния акустических свойств грунта на характеристику направленности излучателя производится приближенными методами.

В данной работе приводится новая методика расчета характеристики направленности точечного источника сферических волн, находящегося в воде над границей раздела вода-грунт.

Геометрия задачи, рассматриваемая в работе, приведена на рис. 1.

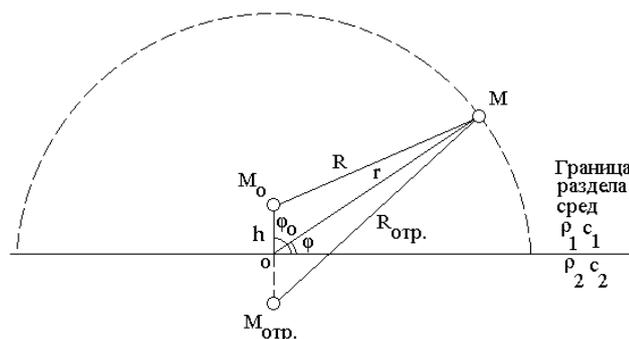


Рис. 1. Геометрия задачи

В качестве математической модели используется уравнение Гельмгольца (1) с граничными условиями (1а):

$$\Delta \varphi_{1,2} + k_{1,2}^2(\bar{\mathbf{r}})\varphi_{1,2} = q(\bar{\mathbf{r}}_0) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho_1 \varphi_1|_s &= \rho_2 \cdot \varphi_2|_s, \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial n}|_s &= \frac{\partial \varphi_2}{\partial n}|_s, \end{aligned} \quad (1 \text{ а})$$

где φ – потенциал колебательной скорости,

$\rho_{1,2}$ – плотность среды,

$c_{1,2}$ – фазовая скорость среды,

$k_{1,2} = \frac{\omega}{c_{1,2}}$ – волновое число среды,

ω – циклическая частота, $\omega=2\pi f$,

$q(\bar{\mathbf{r}}_0)$ – плотность распределения источников,

$\bar{\mathbf{n}}$ – нормаль к границе раздела между средами S,

$\bar{\mathbf{r}}$ – радиус-вектор, указывающий на точку наблюдения,

$\bar{\mathbf{r}}_0$ – радиус-вектор, указывающий на точку расположения источника.

Согласно используемой модели, в случае излучения звука точечным источником в присутствии границы раздела вода-грунт давление для первой среды запишется в виде [3]:

$$P_1(\bar{\mathbf{r}}) = P_0 \cdot \frac{e^{ik_1 R}}{R} + K_{omp} \cdot \frac{e^{-i k_1 R_{отр}}}{R_{отр}}, \quad (2)$$

где $P_1(\bar{\mathbf{r}})$, P_0 – давление отраженной и излученной волны соответственно, R – расстояние между источником в точке M_0 и точкой наблюдения M , $R_{отр}$ – расстояние между мнимым источником отраженных волн в точке $M_{отр}$ и точкой наблюдения M , $K_{отр}$ – функция, зависящая только от угловых координат (имеет смысл коэффициента отражения от границы раздела исходящих от источника волн), k_1 – волновое число в первой среде.

В используемом алгоритме, для нахождения поля в верхней среде вводится мнимый источник отраженных волн $M_{отр}$, зеркально отраженный в нижнюю среду и находящийся на том же расстоянии от границы раздела, что и реальный источник.

Теоретическое выражение для коэффициента отражения сферических волн от дна, исходя из параметров сред, определяется как [3]:

$$K_{omp} = \frac{\left(\rho_1 c_1 \frac{\partial R_{np}}{\partial n} h_0^{(1)}(k_1 R_0|_{S_{гп}}) \cdot h_1^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{гп}}) - \rho_2 c_2 \frac{\partial R}{\partial n} h_1^{(1)}(k_1 R_0|_{S_{гп}}) \cdot h_0^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{гп}}) \right)}{\left(\rho_1 c_1 \frac{\partial R_{np}}{\partial n} h_0^{(2)}(k_1 R_0|_{S_{гп}}) \cdot h_1^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{гп}}) + \rho_2 c_2 \frac{\partial R}{\partial n} h_1^{(2)}(k_1 R_0|_{S_{гп}}) \cdot h_0^{(1)}(k_2 R_{np}|_{S_{гп}}) \right)}, \quad (3)$$

где $S_{гп}$, $\bar{\mathbf{n}}$ – граница раздела двух сред и нормаль к границе соответственно,

R_{np} – расстояние между мнимым источником волн, прошедших во вторую среду, и точкой приема (подробно расчет координат положения мнимого источника изложен в [3]),

R_0 – расстояние между реальным источником и точкой наблюдения,

$k_{1,2}$, $\rho_{1,2}$, $c_{1,2}$ – волновое число, плотность среды и скорость звука в 1 и 2 среде соответственно.

Точечный источник сферических волн M_0 находится над границей, на расстоянии h от границы раздела воды ($\rho_1=1000$ кг/м³, $c_1=1500$ м/с) и грунта с акустическими характеристиками (ρ_2 , c_2). Точки, где рассчитывается поле (положение приемника в точке

М), образуют полукруг в верхней среде с центром в точке 0 и радиусом $г$. Радиус $г$ в расчетах принят равным $100 \cdot \lambda$, где λ – длина акустической волны в верхней среде на частоте 12 кГц.

В ряду рассчитанных значений давления в точках находится максимальное значение, на которое делятся все остальные значения – рассчитывается нормированная характеристика направленности точечного источника сферических волн, находящегося над импедансной границей раздела двух сред.

Предложенная методика была использована для расчета диаграмм направленности точечного источника сферических волн, находящегося на высоте от $0.125 \cdot \lambda$ до $1.25 \cdot \lambda$ над границей раздела вода – мелкий песок ($\rho_2=1910 \text{ кг/м}^3$, $c_2=1711 \text{ м/с}$) на частоте 12 кГц – результаты расчетов представлены на рис. 2.

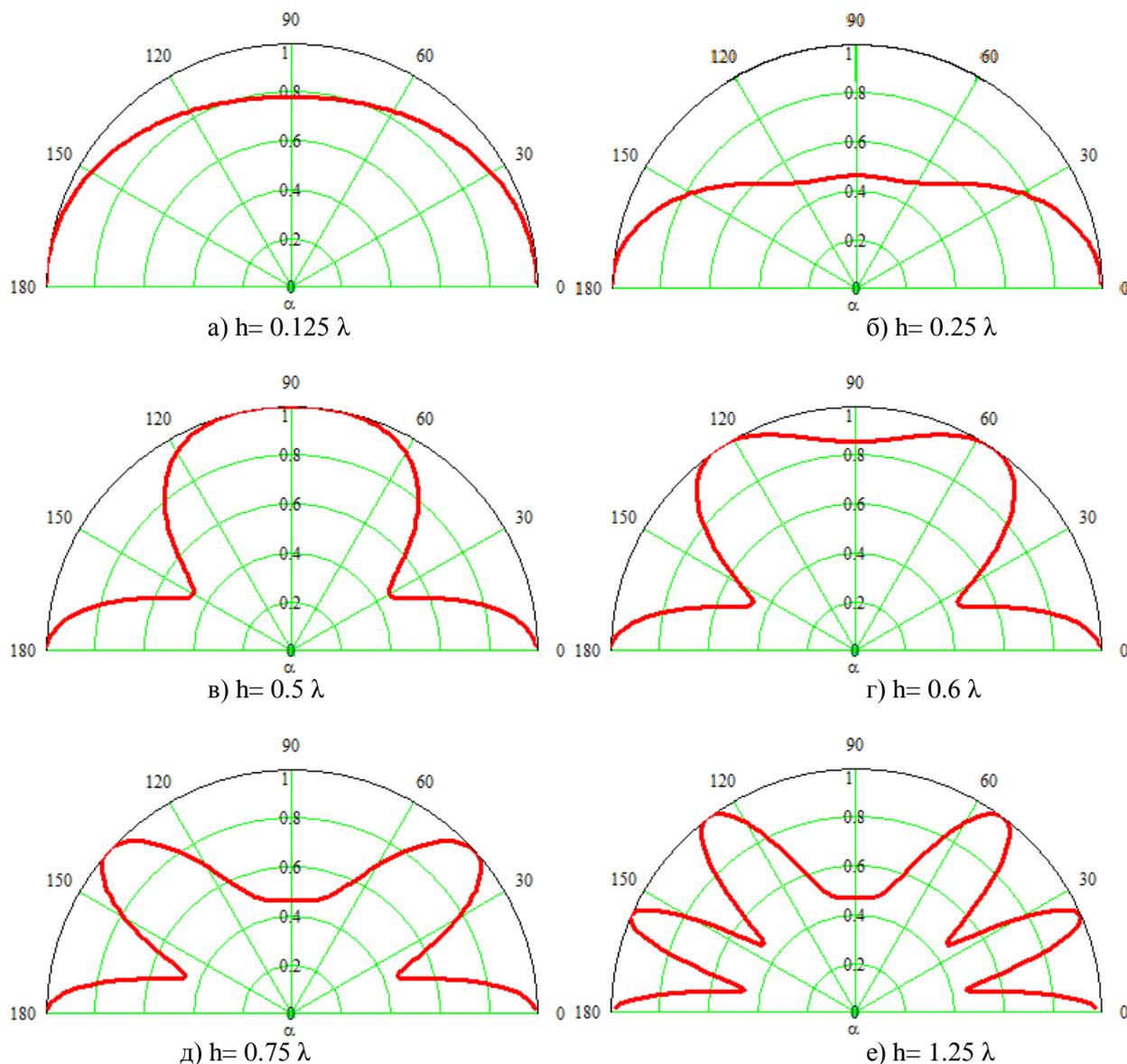


Рис. 2. Диаграммы направленности точечного источника, находящегося на высоте h над границей раздела вода – мелкий песок ($\rho_2=1910 \text{ кг/м}^3$, $c_2=1711 \text{ м/с}$) на частоте 12 кГц

Также был произведен расчет диаграмм направленности точечного источника сферических волн, находящегося на высоте $1 \cdot \lambda$ для разных грунтов – результаты представлены на рис. 3 (параметры грунтов взяты из источника [4]).

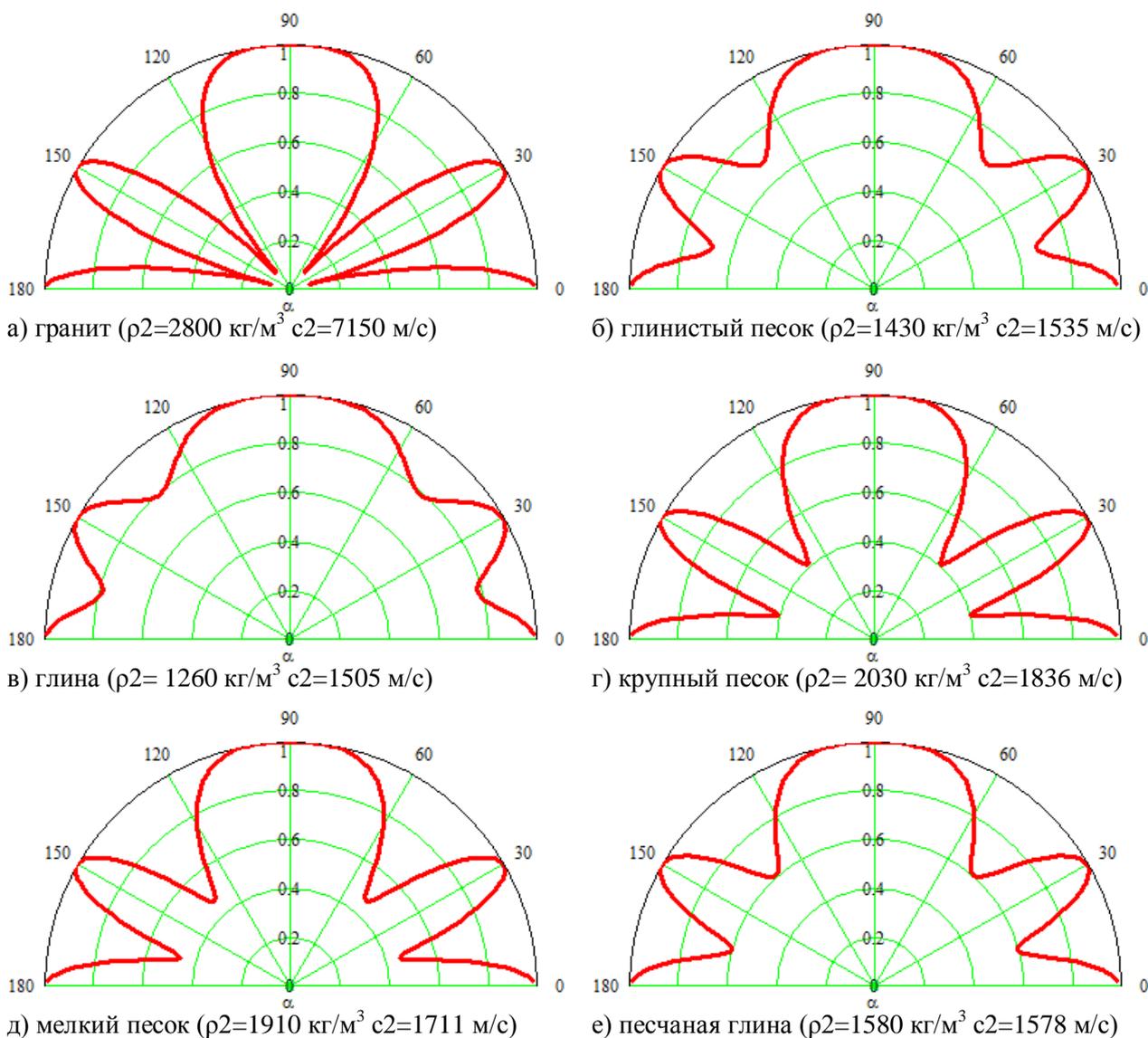


Рис. 3. Диаграммы направленности точечного источника, находящегося на высоте $1 \cdot \lambda$ над границей раздела для разных грунтов на частоте 12 кГц

Из рассмотрения построенных графиков диаграмм направленности можно заключить, что применение предложенного метода расчета позволяет учитывать акустические свойства дна при установке донного излучателя, а также, в некоторых пределах, управлять характеристикой направленности излучателя.

Литература

1. Бородин, В.И. Гидроакустические навигационные средства / В.И. Бородин и др. – Л.: Судостроение, 1983. – 264 с.
2. Агеев, М. Д. Автоматические подводные аппараты / М.Д. Агеев, Б.А. Касаткин, Л. В. Киселев и др. – Л.: Судостроение, 1981. – 224 с.
3. Короченцев, В.И. Волновые задачи теории направленных и фокусирующих антенн / В. И. Короченцев. – Владивосток: Изд-во Дальнаука, 1998. – 192 с.
4. Букатый, В.М. Промысловая гидроакустика и рыболокация / В.М. Букатый. – М.: Мир, 2003. – 496 с.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ*

Д.В. Злобин

Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Пушкинская, 10, тел.: (423) 2454-577, факс: (423) 2268-176,
e-mail: memrbomel@mail.ru

В докладе рассматриваются вопросы оптимизации работы направленной антенны цилиндрического типа, генерирующей придонную волну. Эффективность возбуждения придонной волны определяется вкладом первой обобщенной нормальной волны в общую величину сопротивления излучения антенны. Рассчитаны энергетические характеристики макета излучающей антенны, разработанного в ИПМТ ДВО РАН.

Придонная волна, существование которой предсказано обобщенной теорией нормальных волн в слоистых средах, обладает свойствами, которые делают ее перспективной при разработке средств дальней навигации и мониторинга морского дна. К таким свойствам относятся ярко выраженный максимум на профиле вертикального распределения давления в верхнем слое морского дна и отсутствие дисперсии придонной волны в широком диапазоне частот. Оптимальными для возбуждения придонной волны являются углы скольжения, лежащие в диапазоне $\beta = 0 - \beta_{opt}$, причем угол скольжения β_{opt} соответствует максимуму обобщенного коэффициента прозрачности по энергии границы раздела вода–морское дно и составляет для реальных грунтов осадочного типа $\approx 15^\circ$. Это означает, что при использовании ненаправленного источника излучения большая часть излучаемой мощности уходит либо в грунт, либо расходуется на возбуждение водных лучей или мод и оказывается бесполезно потерянной. Необходимую направленность излучения можно сформировать излучателем монопольного типа с соответствующей апертурой или излучателем типа вертикального диполя с нулевым излучением в горизонтальном направлении.

Для экспериментального исследования придонной волны в Институте проблем морских технологий в 2007 г. был разработан направленный излучатель, выполненный в виде двухмодульной вертикальной цилиндрической антенны. При синфазном включении модулей формируется характеристика направленности монопольного типа, максимум которой соответствует нулевым углам скольжения. При расстоянии между модулями равном нечетному числу половин длин волн уровень боковых лепестков минимален, а ширина характеристики направленности составляет 15° . При противофазном включении модулей формируется характеристика направленности дипольного типа с нулевым уровнем излучения в горизонтальном направлении. Низкочастотный направленный излучатель, входящий в состав тракта излучения, имеет рабочую частоту, которая может перестраивается в диапазоне 1,3–2,6 кГц.

Экспериментальные исследования, выполненные в условиях мелкого моря постоянной глубины в стационарных условиях, позволили надежно идентифицировать медленную придонную волну по скорости ее распространения. Экспериментальные исследования, которые были проведены на одной и той же трассе в различных гидрологических условиях, показали близкое соответствие скорости распространения придонной волны и скорости

* Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» мероприятие 1.2.2 «Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук» (Гос. контракт №2524 от 20.11.09 г.).

звука в придонной области, которая в условиях шельфа принимает минимальное значение вблизи дна.

Рассмотрим работу модельных излучателей монопольного и дипольного типа, работающих вблизи дна. Одной из основных энергетических характеристик антенны является ее сопротивление излучения. Полное сопротивление излучения монополя, как сумма активной и реактивной составляющей, определяется формулой [1]

$$Z_{12} = r_{12} + ix_{12} = \frac{2lk_1}{h} \sum_n \frac{\varphi_n^2(z_q)}{\xi_n E_n H_1^{(2)}(\xi_n a)} \Phi_n^2 \varepsilon_n H_0^{(2)}(\xi_n a). \quad (1)$$

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1,5; & n \in n(1) \\ 1; & n \in 1(2); \\ 0,5; & n \in n(2) - 1(2) \end{cases}$$

$$\varphi(z_q) = \sin(k_{31}z_q), \quad \Phi_n = \frac{\sin(k_{31,n}l)}{k_{31,n}l}, \quad k_{31} = \sqrt{k_1^2 - \xi^2}, \quad k_1 = \omega/c_1,$$

Φ_n – парциальная характеристика направленности для n -ой нормальной волны, z_q – вертикальная координата центра тяжести антенны, $L = 2l$ – апертура антенны в вертикальной плоскости, $r = a$ – радиус антенны, c_1 – скорость звука в воде, ω – круговая частота, ξ_n – постоянная распространения, E_n – коэффициент энергоемкости n -ой нормальной волны. Суммирование в формуле (1) ведутся по регулярным $n(1)$ и обобщенным $n(2)$ нормальным волнам с весовыми коэффициентами ε_n .

Аналогичным образом записывается выражение для полного сопротивления излучения диполя [1]

$$Z_{12} = r_{12} + ix_{12} = \frac{2lk_1}{h} \sum_n \frac{g_n^2(z_q)}{\xi_n E_n H_1^{(2)}(\xi_n a)} \Phi_{n1}^2 \varepsilon_n H_0^{(2)}(\xi_n r), \quad (2)$$

где $g(z_q) = \cos(k_{31}z_q)$, $\Phi_{n1} = \Phi_n \sin(k_{31,n}l)$ – характеристика направленности диполя в свободном пространстве.

В пересчете на нормированный частотный параметр диапазон рабочих частот вертикальной цилиндрической антенны составляет примерно $k_1 h = 150 - 300$. На рис. 5.3 и рис. 5.4 показаны частотные зависимости сопротивления излучения антенны с монопольным и дипольным типом характеристики направленности, рассчитанные по формулам (1) и (2), в диапазоне частотного параметра $k_1 h = 20 - 300$, где h – глубина волновода. Нормированная длина антенны выбрана равной $L_1 = L/h = 0,12$, нормированный радиус антенны – $a_1 = a/h = 0,0025$. На графиках сплошной линией обозначены активные составляющие сопротивления излучения, пунктирной линией – реактивные составляющие.

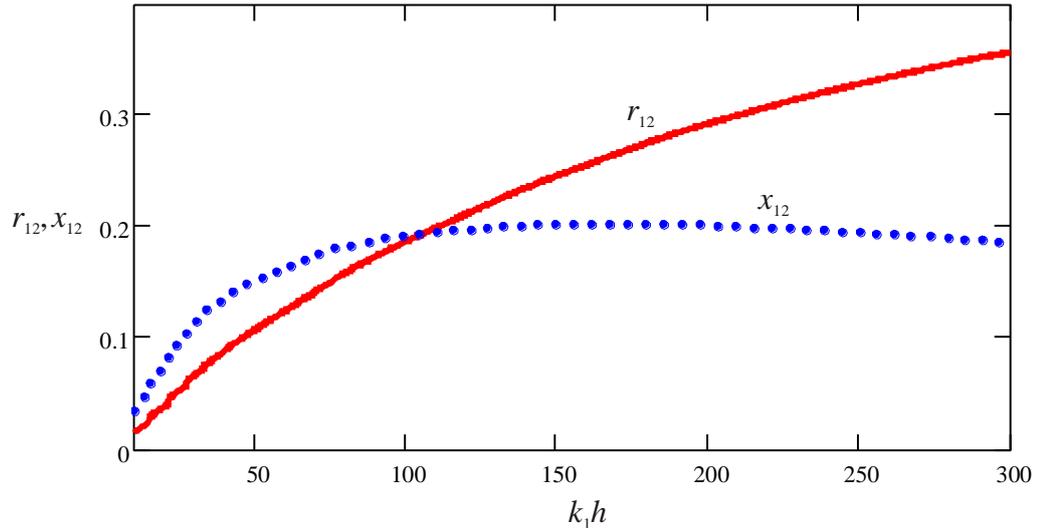


Рис. 1. Сопротивление излучения антенны с монопольным типом характеристики направленности на горизонте $z_{01} = z_0 / h = 0,93$; $L_1 = 0,12$; $a_1 = 0,0025$

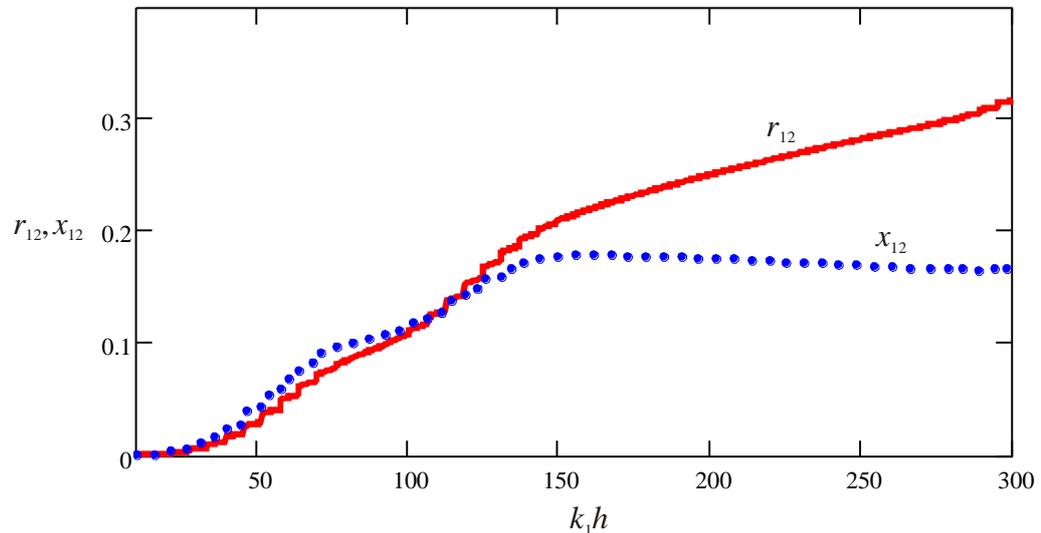


Рис. 2. Сопротивление излучения антенны с дипольным типом характеристики направленности на горизонте $z_{01} = z_0 / h = 0,93$; $L_1 = 0,12$; $a_1 = 0,0025$

Определим уровень первой обобщенной нормальной волны в общем ансамбле мод сопротивления излучения антенны. Гидрологические условия в месте проведения эксперимента были следующими: глубина водного слоя $h = 50$ м, скорость звука в воде $c_1 = 1500$ м/с, скорость звука в осадочном слое морского дна $c_2 = 1750$ м/с, плотность воды $\rho_1 = 1$ г/см³, плотность осадочного слоя $\rho_2 = 1,6$ г/см³. Длина антенны составляла $L = 3,7$ м, радиус пьезоэлемента равнялся $a = 0,075$ м, диапазон рабочих частот антенны лежал в пределах $f = 1,3 - 2,6$ кГц. Два модуля антенны, соединяемые синфазно или противофазно, обеспечивали направленное излучение с характеристикой направленности монопольного или дипольного типа.

Рассмотрим влияние частоты излучения на долю, вносимую первой обобщенной нормальной волной в сопротивление излучения антенны. Данные, приведенные в таблице 1, получены для придонного расположения антенны ($z_{01} = 0,96$; $L_1 = 0,07$; $a_1 = 0,0015$).

Таблица 1. Сопротивление излучения антенны с монопольным типом характеристики направленности; $z_{01} = 0,96$; $L_1 = 0,07$; $a_1 = 0,0015$

Частота $\omega h / c_1$	Общее сопротивление излучения антенны $Z_{12} = r_{12} + ix_{12}$	Сопротивление излучения, определяемое первой обобщенной нормальной волной	Доля активной составляющей сопротивления излучения, определяемая первой обобщенной нормальной волной
300	$0,256 + i 0,19$	$0,014 + i 0,01$	5,5 %
200	$0,192 + i 0,181$	$0,024 + i 0,022$	12,5%
100	$0,108 + i 0,143$	$0,037 + i 0,047$	34,3%
50	$0,058 + i 0,101$	$0,031 + i 0,053$	53,4%
20	$0,016 + i 0,037$	$0,012 + i 0,027$	75%

Приведенные расчетные данные говорят о том, что придонная антенна достаточно эффективно возбуждает придонную волну даже на частоте $\omega h / c_1 = 300$. Общее число мод, захваченных на этой частоте составляет 52 пары, тем не менее, доля первой обобщенной нормальной волны в общем сопротивлении излучения составляет около 6%. С уменьшением частоты активная составляющая сопротивления антенны падает, в то же время вклад первой обобщенной нормальной волны в общее сопротивление излучения растет и в области четвертой критической частоты составляет уже 75%.

Уменьшение размеров антенны в два раза позволяет повысить влияние первой обобщенной нормальной волны на сопротивление излучения почти в четыре раза в высокочастотной области $\omega h / c_1 \sim 300$. С понижением частоты выигрыш падает и практически исчезает на частотах порядка четвертой критической.

В таблице 2 те же данные приведены для антенны с дипольной характеристикой направленности. С точки зрения эффективности селективного возбуждения придонной волны антенна с дипольной характеристикой направленности более предпочтительна, т.к. при одинаковых параметрах антенны и физической среды доля мощности, приходящаяся на первую обобщенную нормальную волну для диполя значительно выше, чем для монополя.

На основании полученных расчетных данных можно сделать следующие выводы:

- чем меньше расстояние от излучающей антенны до дна, тем большая доля излучаемой мощности приходится на придонную волну;

- с уменьшением частоты вклад первой обобщенной нормальной волны в общее сопротивление излучения растет и в области четвертой критической частоты составляет 80–90%;

- уменьшение размеров антенны в два раза позволяет повысить влияние первой обобщенной нормальной волны на сопротивление излучения почти в четыре раза в высокочастотной области $\omega h / c_1 \sim 300$. С понижением частоты выигрыш падает и практически исчезает на частотах порядка четвертой критической;

- с точки зрения эффективности селективного возбуждения придонной волны антенна с дипольной характеристикой направленности более предпочтительна, т.к. при одинаковых параметрах антенны и физической среды доля мощности, приходящаяся на первую обобщенную нормальную волну для диполя значительно выше, чем для монополя.

Таблица 2. Сопротивление излучения антенны с дипольным типом характеристики направленности; $z_{01} = 0,96$; $L_1 = 0,07$; $a_1 = 0,0015$

Частота $\omega h / c_1$	Общее сопротивление излучения антенны $Z_{12} = r_{12} + ix_{12}$	Сопротивление излучения, определяемое первой обобщенной нормальной волной	Доля активной составляющей сопротивления излучения, определяемая первой обобщенной нормальной волной
300	$0,238 + i 0,179$	$0,014 + i 9,564 \cdot 10^{-3}$	5,9%
200	$0,148 + i 0,142$	$0,02 + i 0,018$	13,5%
100	$0,046 + i 0,062$	$0,014 + i 0,018$	30,4%
50	$5,226 \cdot 10^{-3} + i 8,989 \cdot 10^{-3}$	$3,728 \cdot 10^{-3} + i 6,306 \cdot 10^{-3}$	71,3%
20	$2,677 \cdot 10^{-4} + i 6,072 \cdot 10^{-4}$	$2,427 \cdot 10^{-4} + i 5,488 \cdot 10^{-4}$	90,1%

Эффективность возбуждения придонной волны направленной антенной, работающей вблизи дна максимальна при соблюдении двух условий: возможно меньшее число возбуждаемых мод и минимальное расстояние от антенны до дна. Первое условие может быть достигнуто уменьшением рабочей частоты антенны или уменьшением глубины моря при выборе места установки антенны. Второе условие проще выполнить при малых размерах антенны, т.к. чем меньше длина антенны, тем ближе располагается ее центр тяжести ко дну.

Антенна, описанная в эксперименте, имеющая длину 3,5 м, дипольный тип характеристики направленности и работающая на частоте 1,3 кГц в море глубиной $h = 30$ м, должна быть помещена на расстоянии порядка двух длин волн от дна. В этом случае доля мощности, приходящейся на генерацию придонной волны, будет максимальной и равной 19% от общей мощности, излучаемой антенной.

Литература

1. Касаткин Б.А., Злобина Н.В. Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. – М.: Наука, 2009. – 496 с.
2. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Аномальные свойства звуковых полей вблизи морского дна. Ч. 2 // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 2(10). С. 4-16.

ИЗУЧЕНИЕ ВЫМЫВАНИЯ МОРСКОЙ ВОДОЙ ТОКСИКАНТОВ ИЗ ПРОТИВООБРАСТАЮЩИХ ЛКП ВОЛЬТАМПЕРНЫМИ МЕТОДАМИ

В.А. Немов

Тихоокеанский государственный университет
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136,
e-mail: vnemo62@yandex.ru

Рассматриваются результаты изучения динамики вымывания меди из противоположающегося лакокрасочного покрытия (ЛКП) с использованием метода инверсионной потенциодинамической вольтамперометрии (ИВ) в качестве метода контроля токсиканта в морской воде.

Морская вода (МВ) – достаточно агрессивная среда по отношению к объектам, созданным человеком, и в то же время она является средой обитания биообъектов растительного и животного происхождения. Кроме загрязнений, попадающих в морскую воду в результате хозяйственной деятельности человека, большое значение приобретают загрязнения так называемого побочного действия, например, продукты коррозии корпусов судов, причальных сооружений, нефтяных и газовых платформ, компоненты специальных противокоррозионных и противоположающихся лакокрасочных покрытий (ЛКП). Для морских коррозсионистов и специалистов в области промысловой марикультуры большой проблемой являются биообрастания [1].

В этой связи важно иметь научно-обоснованную методику приготовления, нанесения и эксплуатации противокоррозионных и противоположающихся покрытий – лаков и красок со специальными добавками биоцидов на основе, например, токсичных металлов (меди, свинца, олова, ртути, кадмия, мышьяка и т.д.). Такая методика позволит оптимизировать работу биоцида, т.е. увеличить период активного воздействия биоцида и снизить до оптимальной концентрацию биоцидной добавки с тем, чтобы уменьшить вредное воздействие на прилегающую морскую среду. Понятно, что приготовление и внесение противоположающихся добавок важно само по себе, но изучение механизма воздействия биоцида, оценка вымывающей способности МВ по отношению к биоциду представляют самостоятельный интерес [1]. Для решения этих проблем важно иметь надежный, высокочувствительный, недорогой, экспрессный и мобильный метод контроля биоцидных добавок в морской воде. В настоящей работе нами предпринята попытка изучить кинетику вымывания меди из термопластичного ЛКП С-70 естественной МВ, отобранной в заливе Петра Великого. В качестве метода контроля процесса вымывания меди из ЛКП использован метод инверсионной потенциодинамической вольтамперометрии с линейной разверткой потенциала поляризации индикаторного электрода [2, 3].

Метод ИВ имеет существенные преимущества перед другими методами определения токсичных и эссенциальных металлов в морской воде и особенно по сравнению с методом атомно-абсорбционной спектродотометрии (ААС) [4].

Содержащиеся в МВ соли щелочных и щелочноземельных металлов являются прекрасным фоновым раствором в методе ИВ и создают существенные трудности при реализации методов ААС.

Методика эксперимента

На тефлоновый цилиндр диаметром 20 мм и высотой 50 мм наносилась термопластичная опытная краска С-70, в которую предварительно вводилось определенное количество биоцида на основе соединений меди. В стеклянный стакан помещали 1 литр МВ,

погружали в нее окрашенный цилиндр и осуществляли его вращение шпиндельным устройством с постоянной скоростью в течение 8 часов. После этого образец вынимался из МВ и оставался в течение 16 часов на воздухе. В выходные и праздничные дни образец также находился на воздухе. Суммарное время, в течение которого образец контактировал с МВ, составляло 192 часа в течение 40 суток. По предварительной оценке один час испытания вращающегося образца эквивалентен одним суткам его испытания в стационарном режиме. Из стакана отбиралась проба МВ для определения в ней содержания меди методом ИВ. Контролировалось и учитывалось исходное содержание меди в МВ до внесения в нее испытуемого образца.

Методика определения меди в МВ

В предварительно отмытый кварцевый стаканчик вносили 10 см³ анализируемой пробы МВ (рН=2), вносили индикаторный ртутный пленочный электрод и в течение 20 минут проводили деаэрацию пробы током очищенного аргона для удаления кислорода из анализируемой пробы. Затем с помощью полярографа ПУ-1 проводили электронакопление меди при потенциале – 0,8 В в течение 5 минут при перемешивании анализируемого раствора аргоном. После этого давали раствору успокоиться в течение 20 секунд и проводили анодную поляризацию от -0,8 В до +0,2 В при скорости изменения потенциала 600 мВ/мин. При этом регистрировали анодный пик меди ($E_{п} = -0,24$ В). Затем в пробу вносили стандартную добавку меди, перемешивали раствор в течение 1 минуты током аргона и после электролиза и успокоения раствора вновь регистрировали анодный пик меди. Расчет содержания меди в морской воде проводили по методу стандартных добавок.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 и в таблице 1 представлены результаты определения меди в МВ после контакта с ней испытуемого образца. Характер зависимости показывает, что максимальное количество меди в МВ появляется в первые моменты времени контакта образца с водой. При последующих контактах содержание меди в пробах МВ уменьшается, что можно объяснить уменьшением количества меди, вымываемой из ЛКП.

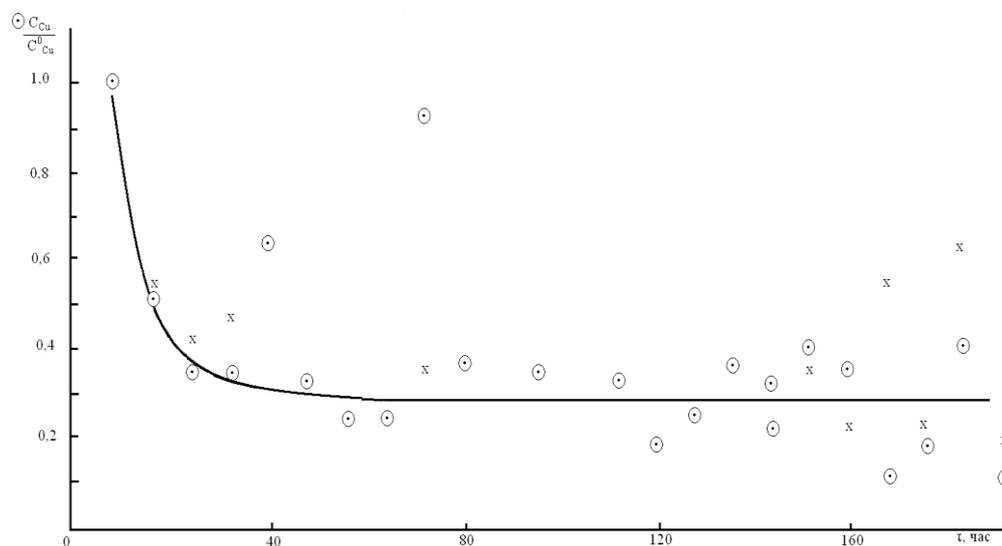


Рис. 1. Зависимость относительной концентрации меди от времени контакта образца с МВ (⊙ – рН > 7, x – рН < 7)

Из рис. 1 видно, что уже через 40 часов пребывания образца в МВ концентрация вымываемой из МВ меди остается на одном уровне. Устанавливается как бы стационарный режим вымывания биоцида, при котором за одинаковое время контакта образца с одинаковыми объемами воды в нее переходит примерно одинаковое количество меди.

Таблица 1. Изменение концентрации меди в МВ в зависимости от времени пребывания в ней испытуемого образца

№ пробы	Время выдержки, час	C(Cu)×10 ⁶ моль/дм ³		$\frac{C(Cu)}{C^0(Cu)}$	v, мкг/см ² × сутки	$\frac{v}{v_0}$
		pH>7	pH<7			
1	8	0,44 (C ⁰)	0,52	1,00	2,45 (v ₀)	1,0
2	16	0,23	0,28	0,51	1,27	0,52
3	24	0,15	0,23	0,35	0,88	0,36
4	32	0,15	0,24	0,34	0,82	0,33
5	40	0,28	-	0,64	1,58	0,64
6	48	0,14	-	0,32	0,79	0,32
7	56	0,10	-	0,24	0,58	0,24
8	64	0,10	-	0,24	0,58	0,24
9	72	0,41	0,17	0,93	2,27	0,93
10	80	0,16	-	0,36	0,88	0,36
11	88	0,70	-	1,60	3,94	1,60
12	96	0,15	-	0,34	0,85	0,34
13	104	0,63	-	1,44	3,55	1,44
14	112	0,14	-	0,31	0,76	0,31
15	120	0,08	-	0,18	0,42	0,18
16	128	0,10	-	0,24	0,58	0,24
17	136	0,15	-	0,35	0,85	0,35
18	144	0,13	0,10	0,29	0,70	0,29
19	152	0,17	0,17	0,38	0,94	0,38
20	160	0,15	0,10	0,34	0,82	0,34
21	168	0,04	0,27	0,09	0,21	0,09
22	176	0,07	0,10	0,17	0,39	0,17
23	184	0,16	0,32	0,38	0,94	0,38
24	192	0,04	0,08	0,08	0,21	0,08

Отклонения отдельных точек, по-видимому, связано с неравномерностью распределения биоцида на разных участках ЛКП. В подкисленной МВ вымывание меди происходит немного энергичнее, чем в подщелоченной.

Коррозионистам привычнее оперировать понятием удельной скорости вымывания биоцида, измеряя ее в мкг/см²×сутки. Поэтому в таблице 1 приводятся результаты по абсолютным (v) и относительным (v/v₀) скоростям вымывания биоцида из ЛКП. Расчет удельной скорости вымывания биоцида проводился по формуле

$$v = m / S \cdot \tau,$$

где: m – масса вымываемого биоцида (мкг), S – площадь поверхности образца с ЛКП (см²), τ – время контакта окрашенного образца с водой (сутки).

Скорость вымывания биоцида с единицы поверхности через 48 часов установилась практически на одном уровне порядка 0,70 мкг/см²×сутки и слабо изменялась до 0,64 мкг/см²×сутки в течение почти 152 часов.

Похожие результаты получены при изучении вымывания и других токсичных металлов из обработанных противообрастающими ЛКП сетематериалов, используемых для доразивания, например, гребешка в специальных садках на морских фермах. Отмечается существенное уменьшение количества морских звезд на обработанных садках по сравнению с необработанными.

Изучен процесс вымывания морской водой токсиканта (меди) из термопластичного ЛКП. Экспериментально определены концентрации меди, вымываемой МВ из ЛКП и рассчитаны абсолютные и относительные скорости процесса вымывания меди.

Показано, что метод ИВ не только пригоден для прямого контроля вымывания биоцида морской водой из ЛКП, но имеет существенные преимущества, например, перед методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС), для которого солевой фон оказывает негативное влияние [4].

Литература

1. Багавеев И.А., Корякова М.Д., Сергиенко В.И. Механизм токсического действия ионов меди на баянусов – представителей сообщества обрастания // Вопросы морской коррозии и биообрастания. – Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1985. – С. 75-83.
2. Немов В.А. Инверсионно-вольтамперометрическое определение тяжелых металлов в морских средах // Методы анализа объектов окружающей среды: сб.тезисов докладов Всесоюзной конференции. 1983. С. 125-126.
3. Немов В.А., Немова В.В. Методы инверсионной вольтамперометрии на Дальнем Востоке. История. Развитие // Материалы международных научных чтений «Приморские зори-2007: Экология, защита в чрезвычайных ситуациях, охрана, безопасность и медицина труда, гигиена питания, образование». – Владивосток: Изд-во ТАНЭБ, 2007. – Выпуск 2. – С. 87-91.
4. Немов В.А. Методы определения микрокомпонентов в морской воде // Материалы международных научных чтений «Приморские зори-2001: Экология, безопасность жизнедеятельности, охрана труда и устойчивое развитие». – Владивосток: Изд-во ТАНЭБ, 2001. С. 110-111.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОДНОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В НЕСИММЕТРИЧНОМ ДИФфуЗИОННОМ ПОЛЕ В УСЛОВИЯХ ПОТЕНЦИОСТАТИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОДА

В.А. Немов, И.А. Калиновский

Тихоокеанский государственный университет
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136,
e-mail: vnemo62@yandex.ru

Рассмотрены результаты моделирования концентрационных профилей в условиях растворной асимметрии в сопряженной диффузионно-контролируемой электрохимической системе при потенциостатической поляризации индикаторного электрода.

Технические средства изучения микрокомпонентного состава морской воды (МВ) в различных точках Мирового океана постоянно расширяются и совершенствуются. Электрохимическая обработка МВ с целью выделения ценных компонентов, исследование коррозионных процессов и методов предотвращения и защиты от коррозии в МВ [1], реализация различных вариантов вольтамперных методов исследования и контроля МВ [2] предполагают, в частности, теоретическое и экспериментальное изучение электрохимических процессов, протекающих в условиях диффузионного контроля [3]. Во всех этих случаях требуется знать концентрационные профили распределения интересующих веществ в соответствующих фазах в зависимости от экспериментально и теоретически значимых параметров [4]. Знание характера концентрационных профилей позволяет рассчитывать концентрационные потоки веществ. Исходя из этих потоков, нетрудно перейти к вольтамперным ($i - E$) зависимостям, позволяющим с одной стороны моделировать желаемый ход процесса [5] и получать информацию о протекании процесса [3], а с другой – судить о качественном и количественном содержании определяемого компонента в анализируемой пробе МВ [6].

В случае протекания обратимого электродного процесса, когда лимитирующей стадией процесса является доставка вещества в зону реакции или отвод продуктов реакции из этой зоны, величина тока на электрод (или с электрода) определяется известным [3] выражением

$$i = z \cdot F \cdot S \cdot q(x, t) = z \cdot F \cdot S \cdot D \cdot \left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x=l}, \quad (1)$$

где: i – ток (А), z – число электронов, S – площадь поверхности электрода, $q(x, t)$ – поток электродноактивного вещества, x, t – соответственно, размерная и временная координаты.

Окончательный вид (1) определяется величиной $C(x, t)$. Для процессов, когда доставка или отвод вещества от межфазной поверхности электрода осуществляются только силами диффузии, выражение для концентрации $C(x, t)$ можно найти решая одно или систему уравнений нестационарной диффузии с определенными краевыми (начальными и граничными) условиями [7], которые определяются геометрией диффузионного поля и характером диффузионного процесса (линейный, сферический, цилиндрический, полубесконечный, ограниченный, симметричный, несимметричный). Такая краевая задача решается различными методами, например, операционным [8].

Целью настоящей работы является нахождение и анализ математических выражений для концентраций окисленной ($C_O(x, t)$) и восстановленной ($C_R(x, t)$) форм электродноактивного вещества в случае растворной асимметрии, установление влияния на них различных факторов: линейных размеров фаз нахождения окисленной (О) и восстановленной (R) форм вещества; времени процесса (t); коэффициентов диффузии D_0 и

D_R для окисленной и восстановленной форм вещества, соответственно; начального соотношения концентраций веществ О и R (θ_0); значения накладываемого потенциала поляризации электрода (θ). Отдельный интерес представляет сравнительный анализ полученных решений для растворной и электродной асимметрий диффузионного поля. Сформулируем краевую задачу. Рассмотрим модель, когда массоперенос осуществляется из области О ограниченной толщины ℓ (раствор) в полубесконечную область R (электрод), т.е. рассмотрим случай несимметричной ограниченно-полубесконечной линейной диффузии (растворная асимметрия). При этом считаем, что в областях R и О перенос вещества осуществляется исключительно диффузией, а коэффициенты диффузии и коэффициенты активности веществ R и О не зависят от концентраций. Диффузия в областях R и О принимается линейной и одномерной. Решаем систему уравнений.

$$\frac{\partial C_O(x,t)}{\partial t} = D_O \frac{\partial^2 C_O(x,t)}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial C_R(x,t)}{\partial t} = D_R \frac{\partial^2 C_R(x,t)}{\partial x^2}, \quad (2)$$

с начальными ($t = 0$)

$$C_O(x,0) = C_O^0, \quad C_R(x,0) = C_R^0, \quad C_O^0 = \theta_0 \cdot C_R^0, \quad \theta_0 = e^{\frac{zF(E_p - E^0)}{RT}} = const, \quad (3)$$

E – электродные потенциалы: E_p – равновесный, E^0 – стандартный. и граничными ($t > 0$) условиями

$$\text{а) } C_R(\infty, t) = C_R^0, \quad \text{б) } \left. \frac{\partial C_O(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

$$\text{в) } D_O \left. \frac{\partial C_O(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\ell} = D_R \left. \frac{\partial C_R(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\ell}, \quad (4)$$

$$\text{г) } C_O(\ell, t) = \theta \cdot C_R(\ell, t), \quad \theta = e^{\frac{zF(E - E^0)}{RT}} = const,$$

E – потенциал поляризации электрода.

Решение краевой задачи выполнено операционным методом [8,9]. Обратная трансформация Лапласа в пространство оригиналов приводит к выражениям для $C_O(x,t)$ и $C_R(x,t)$ в виде

$$C_O(x,t) = C_O^0 + \frac{C_O^0}{\theta'_0} B \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)\ell - x}{2\sqrt{D_O t}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{(2n+1)\ell + x}{2\sqrt{D_O t}} \right) \right), \quad (5)$$

$$C_R(x,t) = C_R^0 - C_R^0 B \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{n\ell}{\sqrt{D_O t}} + \frac{x - \ell}{2\sqrt{D_R t}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{(n+1)\ell}{\sqrt{D_O t}} + \frac{x - \ell}{2\sqrt{D_R t}} \right) \right), \quad (6)$$

где $B = (\theta' - \theta'_0)/(1 + \theta')$; $K = (1 - \theta')/(1 + \theta')$; θ_0 – равновесный потенциал в безразмерном виде; θ – потенциал поляризации электрода (накладываемый потенциал); представленный в безразмерном виде; D_O и D_R – коэффициенты диффузии веществ О и R; соответственно; ℓ – толщина раствора, м; t время, с; x – координата, м.

В частном случае, когда $x = \ell$, выражения для концентраций веществ О и R на межфазной поверхности раствор – электрод записываются в виде:

$$C_O(\ell, t) = C_O^0 + \frac{C_O^0}{\theta'_0} B \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{n\ell}{\sqrt{D_O t}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{(n+1)\ell}{\sqrt{D_O t}} \right) \right), \quad (7)$$

$$C_R(\ell, t) = C_R^0 - C_R^0 B \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{n\ell}{\sqrt{D_O t}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{(n+1)\ell}{\sqrt{D_O t}} \right) \right). \quad (8)$$

Расчеты по уравнениям (5) и (6) выполнены с помощью разработанной оригинальной программы, позволяющей не только рассчитывать концентрационные профили, но и проводить расчеты по уравнениям вольтамперных кривых, получаемым с использованием этих концентрационных зависимостей.

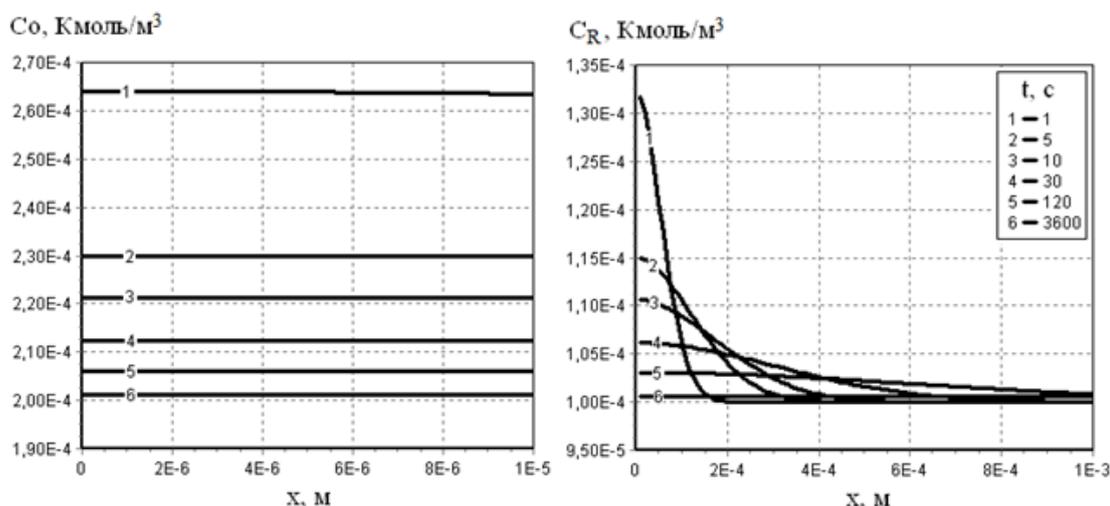


Рис. 1. Концентрационные профили веществ О и R для различных t .
 $\ell = 10^{-5}$ м; $\theta'_0 = 5$; $\theta' = 2$; $D_O = 2.5 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $D_R = 1.6 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $C_O^0 = 5 \cdot 10^{-4}$ Кмоль/м³; $C_R^0 = 10^{-4}$ Кмоль/м³

На рис. 1 приведены результаты вычислений концентрационных профилей веществ О и R в растворе и электроде, соответственно, в случае растворной асимметрии. Если происходит катодный электродный процесс в системе из тонкого слоя раствора ($0 < \ell < 10$ мкм) и достаточно толстого слоя электрода ($0 < \ell < 1$ мм), то концентрационные зависимости C_O для окисленной формы вещества сохраняются постоянными в пределах любого временного интервала ($1 < t < 3600$ с).

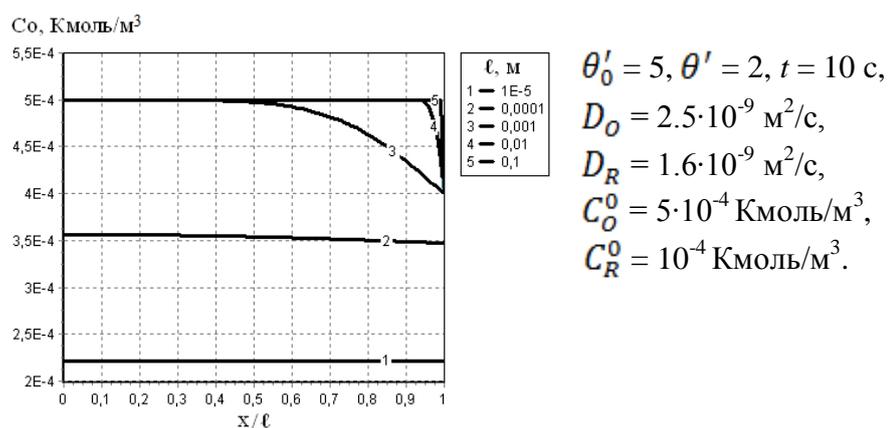


Рис. 2. Концентрационный профиль вещества О в растворе для различных ℓ

Концентрационный профиль существенно зависит от толщины слоя раствора. Для одинакового времени протекания процесса (10 с) с увеличением толщины слоя раствора более заметны изменения величины концентрации вещества О в растворе (рис. 2, кривые 3,4,5). Расчеты показывают, что в тонких слоях раствора уровень концентрации устанавливается достаточно быстро и остается неизменным для любого времени протекания процесса. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными ранее

для случая электродной асимметрии [10], когда рассматривалась система тонкий слой электрода (например, ртутного) – толстый слой раствора в анодном процессе. На рис.3 показаны результаты расчетов, проведенные по соответствующим формулам для вычисления концентраций веществ О и R в случае электродной асимметрии.

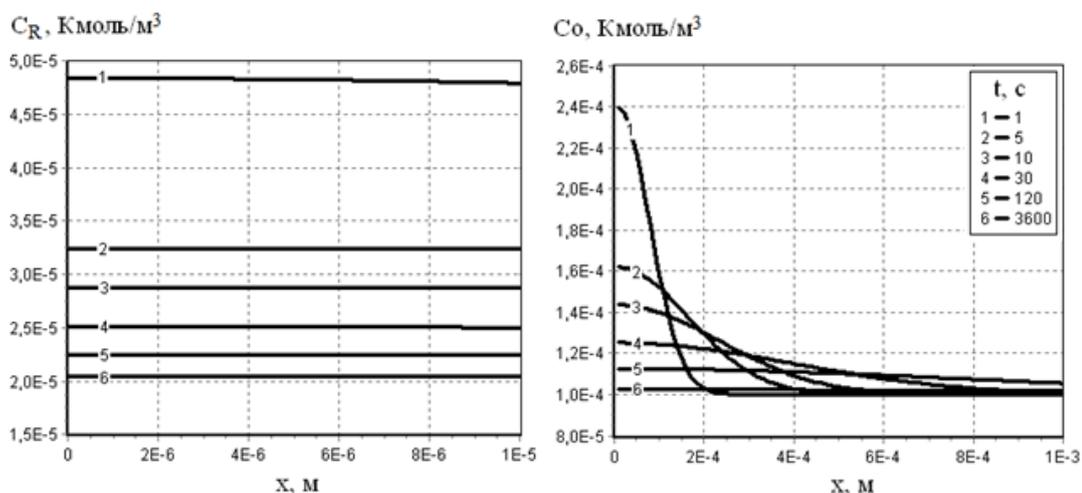


Рис. 3. Концентрационные профили веществ О и R для различных t .
 $\ell = 10^{-5}$ м; $\theta'_0 = 0.1$; $\theta' = 5$; $D_O = 2.5 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $D_R = 1.6 \cdot 10^{-9}$ м²/с; $C_O^0 = 10^{-4}$ Кмоль/м³;
 $C_R^0 = 10^{-3}$ Кмоль/м³

Сравнительный анализ полученных результатов показывает универсальность рассматриваемой математической модели и её применимость для описания как растворной, так и электродной асимметрии диффузионной системы.

Используя уравнения (7) и (8) нами получено новое дополнительное краевое условие (ДКУ) ограниченно-полубесконечной линейной диффузии в случае растворной асимметрии позволяющее развивать теорию вольтамперных кривых при любой форме поляризующего напряжения [5].

$$\sqrt{D_O} C_O(\ell, t) + \sqrt{D_R} C_R(\ell, t) = \sqrt{D_O} C_O^0 + \sqrt{D_R} C_R^0 + 2\sqrt{D_R} C_R^0 B \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n \operatorname{erfc}\left(\frac{(n+1)\ell}{\sqrt{D_O t}}\right). \quad (9)$$

Получаемые с помощью ДКУ (9) уравнения вольтамперных кривых позволяют предложить дополнительные вольтамперные методы исследования электрохимических процессов в растворах электролитов и в морской воде, в частности. Например, для потенциостатической вольтамперометрии (растворная асимметрия) получено уравнение

$$i = -zFSB \frac{C_O^0}{\theta'_0} \sqrt{\frac{D_O}{\pi t}} \left(1 - (1+K) \sum_{n=0}^{\infty} (-K)^n e^{-(n+1)^2 \lambda_0^2} \right) \quad (10)$$

вольтамперной кривой, учитывающее ограниченность диффузионного поля в растворе, соотношение текущего потенциала поляризации и начального (равновесного) потенциала.

В частных случаях из уравнения (10) получаются известные в литературе уравнения Котрела, Делакса для полубесконечной симметричной диффузии.

На рис. 4 представлены результаты вычислений по уравнению (10) в широком диапазоне изменения параметров θ' и θ'_0 при фиксированном λ_0 . Проведенные расчеты показывают, что существенное влияние на концентрационные профили оказывает величина начального (равновесного потенциала), который можно определять исходя из вольтамперных потенциостатических кривых. Действительно, ток равен нулю при $\theta' = \theta'_0$.

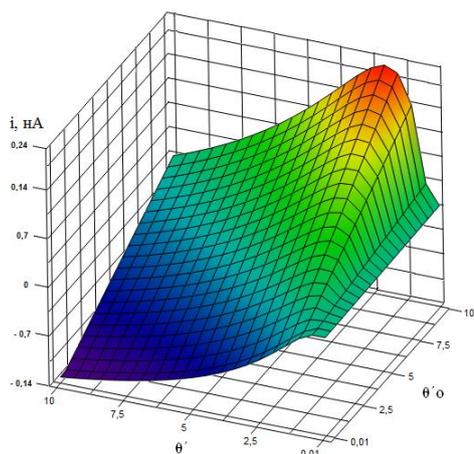


Рис. 4. Зависимость тока i на электрод от потенциалов θ' и θ'_0 .

$$\lambda o = \ell / \sqrt{(D_o t)} = 0.5.$$

$$D_o = 2.5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$D_R = 1.6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$t = 1 \text{ с},$$

$$C_R^o = 10^{-4} \text{ Кмоль/м}^3,$$

$$S = 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$z = 1.$$

Остальные обозначения общеизвестны.

Знание концентрационных профилей и влияния на них различных факторов (экспериментальных условий) позволяет также разработать конструкции электрохимических ячеек для лабораторного и дистанционного вольтамперометрического контроля микрокомпонентного состава морской воды, что может быть востребовано, например, морскими химиками, экологами, океанологами, промысловиками, технологами.

Литература

1. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней // Химия. – Л., 1989.
2. Немов В.А. Методы определения микрокомпонентов в морской воде // Материалы международных научных чтений «Приморские зори – 2001: Экология, безопасность жизнедеятельности, охрана труда и устойчивое развитие». – Владивосток: ТАНЭБ, 2001. С.110-111.
3. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику. – М.: Высшая школа. – 1975. – С.186.
4. Выдра Ф., Штулик К., Юлакова Е. Инверсионная вольтамперометрия. – М.: Мир. 1980.
5. Немов В.А. Измерительные процессы и датчики в вольтамперометрическом контроле морской среды обитания // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана», Владивосток, 22-25 сентября 2009. С. 256-261.
6. Немов В.А. Инверсионно-вольтамперометрическое определение тяжелых металлов в морских средах // В сб. тезисов докладов Всесоюзной конференции «Методы анализа объектов окружающей среды», М., 1983. С. 125-126.
7. Соболев С.Л. Уравнения математической физики. – М.: Наука. – 1966.
8. Римский-Корсаков Б.С. Операционное исчисление – М.: Высшая школа. 1970.
9. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z – преобразования. – М.: Наука. – 1971.
10. Немов В.А. Влияние ограниченности диффузионного поля на концентрационный профиль электрохимически активных веществ при наложении постоянного потенциала // Тезисы докладов I Международной научной конференции «Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии», Изд-во ИГХТУ, Иваново-Плес, 2008. С. 65.

О ПРИМЕНЕНИИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ТОТАЛЬНОЙ ДОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

С.В. Максимов

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики
630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86, тел.: (383) 269-83-42,
e-mail: max_step.89@mail.ru

В докладе рассматривается возможность применения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) с целью управления работой комплекса автономных донных станций, обеспечивающих реализацию технологии тотальной донной сейсморазведки. Выполнена оценка вероятностно-временных характеристик применения АНПА, произведено сравнение их с характеристиками других возможных методов управления работой донных станций.

Разведанные запасы углеводородов в мире истощаются с каждым годом. В этой связи встает вопрос о разработке новых запасов.

Мировая тенденция такова, что добыча нефти постепенно перемещается с континента на шельф [1]. По разным оценкам, Российский шельф может содержать от 50 до 80% потенциальных углеводородных запасов России, что позволяет считать данное направление развития нефте- и газоперерабатывающей индустрии перспективным [2]. Кроме того, на шельфе Северного Ледовитого океана сосредоточены значительные рудоносные провинции, однако в России всего лишь около трех процентов нефти добывается на шельфе. Прежде чем заниматься нефтедобычей, необходимо разведать и оконтурить подходящие месторождения.

Одной из перспективных технологий разведки углеводородных месторождений на шельфе, является технология тотальной донной сейсморазведки, разработанная Санкт-Петербургской компанией «Сейсмо-Шельф» [3]. Технология основывается на использовании автономных самовсплывающих донных станций (ДС), расставляемых вдоль профиля, приблизительно через 50 м друг от друга (рисунок 1). Общее количество устанавливаемых вдоль профиля донных станций может достигать 220 [3].



Рис. 1. Технология тотальной донной сейсморазведки [3]

Управление работой станций осуществляется с судна обеспечения с помощью аппаратуры гидроакустической связи, управления и навигации «Марина 2», разработанной в СибГУТИ, посредством передачи станциям команд управления, в ответ на которые станции посылают в обратном направлении квитанции, свидетельствующие об исполнении (неисполнении) команды или пакеты слова состояния, несущие в себе информацию о состоянии подсистем ДС [4].

Однако, управление работой ДС с судна обеспечения не всегда возможно, по причине шторма, непогоды, установления временного ледяного покрова в месте проведения сейсморазведки. Таким образом, возникает задача дистанционного управления работой ДС в процессе сейсморазведки, без участия судна обеспечения (предполагается использование судна лишь для постановки и подъема донных станций).

Рассмотрено три метода реализации системы дистанционного управления работой ДС. Первый – передача сигналов управления по цепочке от станции к станции (рис. 2). Второй – передача сигналов управления через систему дополнительных ретрансляторов, устанавливаемых вдоль профиля, (рис. 3). Третий – осуществление управления работой ДС с помощью автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), (рис. 4). Во всех рассматриваемых методах для управления работой ДС используется аппаратура и система сигналов «Марина 2» [4].

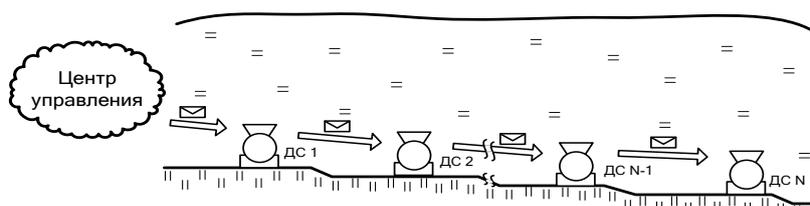


Рис. 2. Метод передачи сигналов управления по цепочке от станции к станции

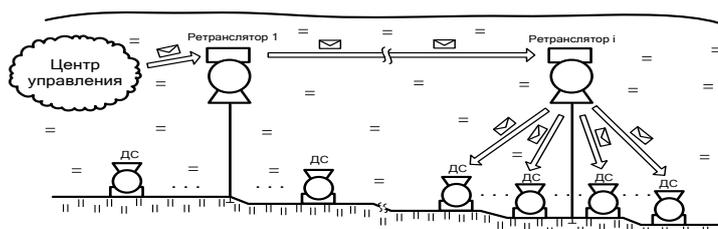


Рис. 3. Метод передачи сигналов управления с помощью системы дополнительных ретрансляторов

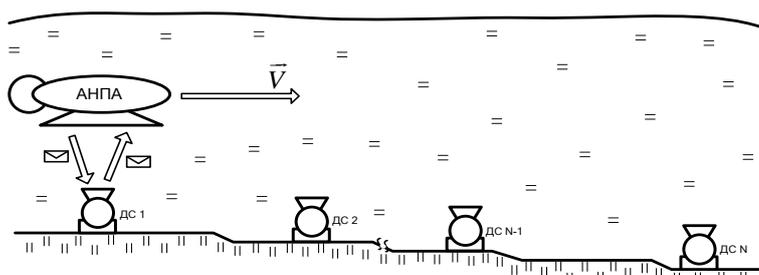


Рис. 4. Метод управления донными станциями с помощью АНПА

В качестве критериев сравнения указанных методов использовались:

1. Вероятность прохождения сигнала управления по кольцу управления [4], то есть вероятность того, что команда будет безошибочно доставлена до станции назначения, исполнена, в ответ из ДС передана квитанция на нее, которая будет принята центром управления без ошибок. Поскольку для каждой конкретной станции вероятность прохождения сигнала управления по кольцу управления различается, поэтому сравнение осуществлено по средней вероятности прохождения сигнала управления по кольцу управления.

2. Время управления – время, за которое команда управления безошибочно доставляется из центра управления до станции назначения, выполняется, и центром

управления от данной станции получается квитанция (или запрашиваемый информационный пакет). Поскольку для каждой конкретной станции время управления различается, поэтому сравнение осуществлено по времени опроса всех станций.

Для упрощения оценки вышеуказанных характеристик осуществлена некоторая идеализация условий для каждого из предложенных методов.

Для метода передачи сигналов управления от станции к станции, было принято, что расстояния между соседними станциями всегда одинаковое, связь центра управления с первой донной станцией осуществляется по гидроакустическому каналу связи и расстояние между центром управления и первой ДС такое же, как и между соседними станциями.

Для метода передачи сигналов управления через систему дополнительных ретрансляторов было сделано предположение, что в месте проведения исследований постоянная глубина, ровное дно, расстояния между соседними ретрансляторами одинаковые, все ретрансляторы располагаются на одинаковой высоте над своими донными станциями, и за каждым ретранслятором закрепляется одинаковое количество донных станций (при расчетах было принято, что за каждым ретранслятором закрепляется 11 ДС, тогда для проведения сейсморазведки требуется 20 ретрансляторов); связь центра управления с первым ретранслятором осуществляется по гидроакустическому каналу связи, расстояние между центром управления и первым ретранслятором такое же, как и расстояние между соседними ретрансляторами.

Для метода управления работой ДС с помощью АНПА было наложено ограничение на скорость движения аппарата, чтобы он не останавливаясь мог опрашивать ДС (при расчетах было принято, что скорость движения АНПА равна 1,028 м/с, высота аппарата над донными станциями составляет 10 м). Так же было принято, что аппарат, после того как опросит все станции, всплывает на поверхность, чтобы передать в центр управления групповую квитанцию о состоянии всех ДС.

В таблице представлены результаты оценки средней вероятности прохождения сигнала управления по кольцу управления при различных значениях вероятности ошибки в канале связи для каждого из рассматриваемых методов.

Метод передачи сигналов управления	Средняя вероятность ошибки в канале связи		
	$7 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Передача сигналов управления по цепочке от станции к станции	0,709	0,935	0,979
Передача сигналов управления через систему дополнительных ретрансляторов	0,167	0,336	0,472
Управление работой ДС с помощью АНПА	0,996693	0,999386	0,99981

Для определения времени опроса всех станций сначала было определено среднее время управления (среднее арифметическое времен управления каждой конкретной станцией), затем полученное значение было умножено на количество донных станций, задействованных в процессе сейсморазведки.

Поскольку для каждого из методов, вероятность прохождения сигнала управления по кольцу управления имеет ненулевое значение, то она учитывалась при оценке. Учет данной вероятности осуществлялся следующим образом: если сигнал управления не прошел с первого раза, то он передается повторно, если не проходит со второго, то передается в третий раз. Количество повторов ограничивалось тремя.

Для наглядности сравнения предложенных методов по данному критерию на диаграмме (рис. 5) представлены результаты оценки времени опроса всех станций для каждого из рассматриваемых методов.

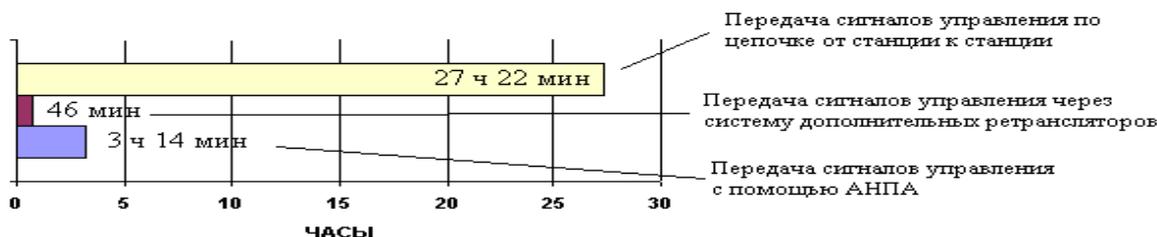


Рис. 5. Результаты оценки времени опроса всех станций для различных методов передачи сигналов управления

Таким образом, в результате сравнения показателей наиболее перспективным для реализации системы дистанционного управления работой ДС в технологии тотальной донной сейсморазведки следует признать применение АНПА.

Для успешного выполнения миссии опроса донных станций при проведении сейсморазведки на шельфе к выбранному АНПА предъявляется определенный набор требований.

Чтобы аппарат мог без затруднений передвигаться в зоне проведения исследований аппарат должен быть оснащен навигационной системой, позволяющей ему двигаться по строго определенному маршруту. Для определения моментов, когда следует начинать передавать сигналы управления донным станциям, необходимо оснастить АНПА средствами обнаружения донных станций.

Чтобы АНПА мог опрашивать донные станции, проходя над ними вдоль профиля и не останавливаясь, следует соответствующим образом выбирать скорость движения аппарата и его высоту над ДС (рис. 6). Скорость движения аппарата выбирается таким образом, чтобы, проходя над донной станцией, АНПА смог три раза передать ей команду управления и получить соответствующую квитанцию (на случай если сигнал не пройдет с первого раза):

$$v \leq \frac{x}{3 \cdot 2 \cdot t_{пер} + t_{распр} + t_{обр}}, \quad (1)$$

где x – диаметр основания конуса диаграммы направленности антенны ДС, который легко можно связать с высотой аппарата над донными станциями соотношением: $x = 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$;

$t_{пер}$ – время, затрачиваемое на передачу сигнала команды (квитанции);

$t_{распр}$ – время распространения сигнала в водной среде, от АНПА до ДС;

$t_{обр}$ – время обработки сигнала команды в приемнике донной станции.

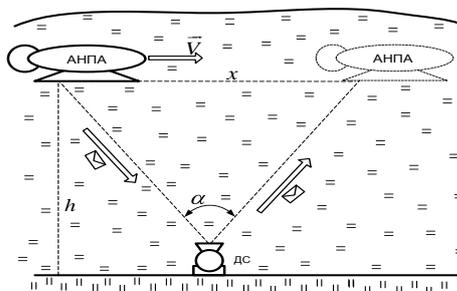


Рис. 6. Пояснение к выбору скорости движения АНПА

На рис. 7 приведена зависимость максимально допустимой скорости движения АНПА от высоты аппарата над донными станциями для разных растров диаграмм направленности антенн донных станций α .

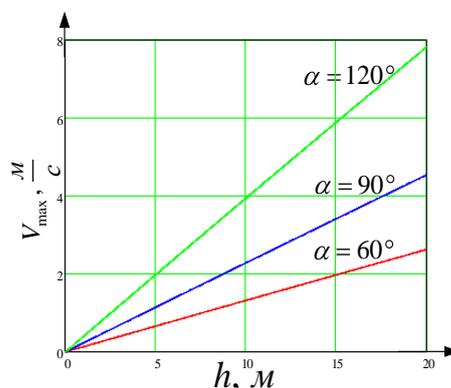


Рис. 7. Зависимость максимально допустимой скорости движения АНПА от высоты аппарата над ДС, для различных диаграмм направленности антенн.

Технология тотальной донной сейсморазведки предполагает применение донных станций с глубиной постановки до 1000 м. Поэтому для дистанционного управления ими следует применять АНПА с рабочей глубиной не менее 1000 м.

Для «общения» с донными станциями АНПА должен быть оснащен модулем аппаратуры ГАКС «Марина 2»; иметь запас электроэнергии как минимум на 7 часов работы, чтобы успешно пройти вдоль профиля, опросить все станции, всплыть на поверхность, передать в центр управления информацию о состоянии донных станций и вернуться на базу.

В качестве аппаратов, пригодных для управления работой ДС в процессе тотальной донной сейсморазведки можно порекомендовать следующие модели: солнечный автономный необитаемый подводный аппарат (САНПА) – совместный проект Института проблем морских технологий (ИПМТ) ДВО РАН и американского института автономных подводных систем [5]; Explorer [6], разработанный канадской фирмой International Submarine Engineering Ltd (ISE); аппарат GAVIA, разработанный Исландской фирмой Teledyne Gavia [7].

Литература

1. Мир нефти. Добыча нефти на шельфе. URL: <http://mirnefti.ru/index.php?id=10> 17.03.2011
2. Добыча полезных ископаемых. URL: <http://coroma.ru/> (дата обращения 17.03.2011).
3. Технология тотальной донной сейсморазведки. URL: www.seismoshelf.com (дата обращения 18.03.2011).
4. Технические характеристики аппаратуры гидроакустического канала связи «Марина 2».
5. Автономные необитаемые подводные аппараты, ИПМТ ДВО РАН URL: <http://www.febras.ru/~imtp/anpa/anpa.html> (дата обращения 21.03.2011).
6. International Submarine Engineering Ltd. (ISE) URL: <http://www.ise.bc.ca/> (дата обращения 20.05.2011).
7. Teledyne Gavia Autonomous Underwater Vehicles. URL: <http://www.gavia.is/> (дата обращения 20.05.2011).

ПОДВОДНЫЕ БИОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ В СИСТЕМЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АКВАТОРИЙ МОРСКИХ ПОРТОВ

В.Е. Молотков

Институт проблем морских технологий ДВО РАН
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 2433059,
e-mail: mol@marine.febras.ru

В работе рассматриваются вопросы использования гидробиотехнических подводных комплексов мелиорации и марикультуры в системе экологической безопасности акваторий морских нефтепортов.

На ДВ побережье, благодаря самому выгодному транспортно-географическому расположению, Южно-Приморский природно-хозяйственный район с акваториями залива Петра Великого испытывает наибольшую техногенную нагрузку. Например, в воды залива ежегодно поступает до 80 тонн нефтепродуктов в растворенном и эмульгированном виде. Ежегодно в порты з. Петра Великого заходят 16 тыс. судов (из них 10 тыс. в порт г. Владивостока). В б. Козмино размещен терминал нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан с объемом планируемой переагрузки нефти до 80 млн. тонн в год. На берегах залива Петра Великого планируется строительство 18 нефтехранилищ емкостью по 100 тыс. т. общим объемом 1,8 млн. т. Для доставки нефти в страны АТР планируется использование за год более 830 супертанкеров водоизмещением 150-300 тыс. т. В этих условиях, объемы загрязнения морских портов и окружающих акваторий в з. Петра Великого нефтепродуктами будет увеличиваться во много раз.

Сохранение стабильности состояния морских биоценозов и экологической безопасности режима вод акваторий нефтепортов в условиях специфичных антропогенных воздействий является актуальной проблемой марихозяйственной деятельности и рационального природопользования. Минимизация техногенных нагрузок на биологические компоненты экосистем морской среды в портах, включающие нефтетерминалы с интенсивной загрузкой углеводородов (или их производных), обеспечивается за счет имеющихся технологий природоохранных мероприятий, которые определяют экологическую безопасность данных акваторий [1]:

- меры безопасности при проведении бункеровочных и грузовых операций с нефтепродуктами (очистные технические сооружения, боновые ограждения, технические особенности конструкций причалов и т.д.);
- безопасность условий мореплавания и эксплуатации судов (танкеров);
- комплексные мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций и их ликвидации при эксплуатации морских нефтетерминалов;
- эко-аналитический контроль деятельности нефтепортов на окружающую среду (состояние и качество атмосферного воздуха и воды районов, прилегающих к морским нефтетерминалам).

Перечисленный выше комплекс мер безопасности и контроля функционирования портов с перегрузкой нефтепродуктов, определяется согласно основным директивным документам Правительства РФ («Ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов» от 21.08.2000 г., № 613), Министерства энергетики РФ (Приказ от 19.06.03 г., № 232), МЧС РФ (Приказ от 28.12.04 г. № 621) и др. В разработанных планах АРН (утверждаемых капитанами морских портов) учтены все возможные сценарии нефтеразливов, кроме того,

предусмотрены меры исключения возникновения чрезвычайных ситуаций и проработаны способы по их ликвидации с целью обеспечения экологической безопасности акваторий.

Основными мерами по предотвращению загрязнения акваторий нефтепортов являются не только правила обслуживания судов, закрепленные в соответствующих документах, но и, в первую очередь, контроль и способы улучшения качества морской воды до нормативного состояния. Качество водной среды в целом и морской – в частности, имеет не только экологическое, но и экономическое значение для оценки пригодности использования этих водных ресурсов в марихозяйственных и рекреационных целях.

Для получения достоверной экологической информации оценки состояния окружающей среды в районах действующих нефтетерминалов необходимы исследования мониторингового характера качества воды и постоянный контроль за сукцессией видового состава, биопродуктивностью и запасами промысловых объектов. Экологический мониторинг позволяет определять тренды изменения в прибрежных акваториях, происходящие в результате техногенных нагрузок на морские экосистемы. Если изменения достигли эволюционного уровня, то практически маловероятно предположить обратный ход процессов преобразования в морских биогеоценозах (например, сохранения видового биоразнообразия, увеличения репродукционных и продукционных возможностей промысловых видов гидробионтов и т.д.). Методы запретительного характера, направленные на восстановление качества среды, в большинстве случаев не приводят к желаемым результатам. Самовосстановление качества морской среды и увеличение объемов биоресурсов после техногенных воздействий и катастроф происходят десятилетиями, а примеры их полного восстановления единичны. Необходимы активные меры по стимулированию продукционных и деструктивных процессов в экосистемах с нарушенным балансом вещества и энергии. Мелиорация (Melioration (лат.): улучшение) – термин отражающий системное влияние на то, что принято называть экологическим улучшением состояния экосистемы. Биологическая очистка вод определяется способностью морских организмов к накоплению и переработке химических элементов и соединений. Создав условия для совместного культивирования фильтратов и детритофагов, можно реально способствовать восстановлению природной структуры микроорганизмов, способствующих поддержанию экологического равновесия. Биологическое очищение моря происходит за счет биоседimentации и осветления воды животными-фильтраторами, минерализации органического вещества животными детритофагами, фотосинтетической аэрации воды зарослями водорослей и трав и обогащения ее биологически активными метаболитами, инкорпорации поллютантов и биологической детоксикации химических соединений.

Актуальность создания искусственной гидробиотехнической системы очистки вод (ГБТСОВ) с помощью модульных многоярусных рифовых конструкций с гидробионтами-фильтраторами для поддержания экологических норм в прибрежной морской акватории нефтепортов, мест добычи и разливов нефти в море не вызывает сомнений. Целью экологической инженерии в отношении использования и обработки морских вод, подвергающихся антропогенному воздействию, является оздоровление не только части морских биоценозов, но также целостной экосистемы и не только обеспечения непосредственных потребностей в экологической безопасности в настоящем времени, но в долговременной пользе в будущем [2].

Искусственная гидробиотехническая система очистки морских вод прибрежной морской акватории представляет собой экономичную в техническом исполнении конструкцию, создающую дополнительную площадь/поверхность для формирования и развития сообществ различных морских организмов, участвующих в процессе мелиорации морской среды. Мобильность различных подводных конструкций ГБТСОВ (в виде искусственных рифов) допускает их размещение в непосредственной близости от источника загрязнения (например, нефтяного терминала, сброса льяльных вод, канализационных и

ливневых стоков, дноуглубительных работ и т.д.), создавая, тем самым, искусственный барьер-фильтр на пути возможного распространения загрязняющих веществ по всей акватории водоема.

Развитие основных обрастателей-фильтраторов естественным образом увеличивает поверхность гидротехнической конструкции и создает дополнительные площади для расселения разнообразных морских организмов, в первую очередь, микроорганизмов, составляющих второе звено гидробиологической системы по трансформации и утилизации загрязнения, повышая тем самым потенциал самоочищения всей акватории. Гидробиотехническая система очистки морской воды осуществляет (обеспечивает) непрерывность процесса оздоровления загрязненного района, и ее мощность рассчитывается для конкретной акватории с учетом количества и постоянства источника загрязнения. Среди организмов-обрастателей ГБТСОВ первым звеном являются двусторчатые моллюски. Один моллюск размером 35-40 мм способен отфильтровывать до 1400 см^3 морской воды в час. При средней плотности обрастания $2500-3000 \text{ экз./м}^2$ объем фильтрации составляет $84-100 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Имеющиеся в эксплуатации подводные системы в виде искусственных рифов с мидиями-фильтраторами профильтровывают десятки тысяч м^3 морской воды в сутки, освобождая ее от взвешенных и эмульгированных загрязнений [3]. Так, одна мидия массой 8 граммов за час отфильтровывает около четырех литров воды. За год 1 га мидийной плантации способна очистить до 3 млн. м^3 воды, извлекая из нее до 9 тыс. т бактерий [4]. Технологически привлекательность мидий для аквакультуры и экотехнологии определяется не столько темпами их роста, сколько их способностью самостоятельно и полностью обеспечивать себя пищей не сходя с места. Использование биотехнической системы приведенной в работе [3] позволяет активно бороться с нефтяными загрязнениями, превышающим ПДК от 1 до 100 (0,05-5,0 мг/л), при этом моллюски-фильтраторы (мидии) не теряют своей активности по очистке морской воды при концентрации нефтепродуктов в 5-8 мг/л, т.е. превышая величину ПДК в десятки раз.

Экологическая инженерия широко использует аквакультуру, включающую культивирование разных видов водорослей и животных, ведь обе эти технологии основаны на одинаковом принципе использования природных процессов циркуляции вещества и энергии для извлечения пользы в виде получаемой биопродукции и чистой воды. Существуют гидробиологические способы борьбы с загрязнениями, использующие технологии марикультуры [5]. При нормативном качестве воды и экологических параметров морской среды модульные системы ГБТСОВ могут выступать в роли гидротехнической системы марикультуры для культивирования отдельных видов (объектов) гидробионтов. Как и в экологической инженерии, технология культивирования водных организмов включает определенные операции по использованию и изменению природных жизненных циклов рыб, моллюсков, ракообразных, иглокожих и водных растений. Однако, в отличие от аквакультуры, основой экологической инженерии является экология, в то время как аквакультура руководствуется, в первую очередь, производственными возможностями отдельных видов для извлечения непосредственной коммерческой выгоды. При комплексном подходе рационального водопользования выращивание в гидробиологических системах марикультуры (ГБТС) морских организмов в умеренно загрязненных водах представляет собой реальный путь очищения морской среды до уровней, исключающих экологические кризисы. Морские организмы, включая водоросли, используемые для очистки грязной акватории, впоследствии должны изыматься из рекреационного хозяйства и утилизироваться. В акваториях со слабым водообменном существует опасность образования застойных зон и возникновения вторичного загрязнения, так как животные и растения концентрируют и накапливают в себе вредные вещества. При отмирании гидробионтов и дальнейшей минерализации эти вещества вновь поступают в водную среду. Поэтому, для разработки и реализации каждого проекта биотехнической очистки морских вод конкретного

порта, с помощью мелиорации и технологий марикультуры, требуется проведение индивидуального комплекса исследований определяющих: состав и мощность загрязнений, гидрологические условия акватории, места установки модульных гидробиологических систем очистки вод и ГБТС культивирования отдельных видов гидробионтов, сбор выращенной продукции или ее утилизации.

Многоярусные технические сооружения (ГБТСОВ) в виде искусственных рифов, устанавливаются на дне акватории нефтепорта (глубины 10-50м) с помощью плавкранов. Установка гидротехнических подводных сооружений в виде ГБТСОВ позволяет решать две задачи: защита от неблагоприятных для экологии воздействий работы нефтетерминала (биотехническая очистка вод) и культивирование промысловых видов гидробионтов (объекты марикультуры). После подъёма сооружений (через 2-4 года), последние обслуживаются на берегу для сбора урожая гидробионтов марикультуры без применения водолазного труда. Производительность труда, при таком подходе, может быть увеличена многократно. Получаемая прибыль от культивирования различных видов гидробионтов в комплексной системе хозяйствования может быть использована на цели технического усовершенствования конструкций ГБТСОВ в системе экологической безопасности акваторий нефтепортов.

Литература

1. Кувшинов А.И., Ворсина А.В. Экологическая безопасность морских акваторий // Мат. IV Межд. эколог. форум. «Природа без границ» 6-8 октября 2009 г. Владивосток. Изд-во ООО «РЕЯ», 2009. С.159-162.
2. Mitsch W.J. Ecological engineering - the 7- year itch // Ecol. Eng. 1998. Vol. 10, №2. P. 119-130.
3. Поляков А.С., Гринцов В.А., Губанов В.И., Суботин А.А., Иванов В.Н. Способ мелиорации прибрежных экосистем. Патент UA 77351 C2. 2006.
4. Алемов С.В. О создании искусственных поселений мидий в целях гидробиологической очистки морских нефтесодержащих вод // Искусств. рифы для рыб. хоз-ва. тез. докл. Всес. конф., Москва, 2-4 декабря, 1987. С.69-71.
5. Миронов О.Г., Алемов С.В., Осадчая О.С. Гидробиологический способ борьбы с загрязнениями морских акваторий. Патент UA 21460 C2. 2005.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ПОЛУОСТРОВА МУРАВЬЕВА-АМУРСКОГО (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО)

М.З. Ермолицкая

Институт проблем морских технологий ДВО РАН
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел./факс: (423) 2432587,
e-mail: erm@marine.febras.ru

В докладе приведены результаты исследования экологического состояния прибрежных вод, омывающих полуостров Муравьева-Амурского. Основными источниками загрязнения являются неочищенные и недостаточно очищенные сбросы различных предприятий г. Владивостока.

Полуостров Муравьева-Амурского омывается водами залива Петра Великого Японского моря (западная сторона омывается водами Амурского залива, восточная – водами Уссурийского залива, в южной части – пролив Босфор Восточный). На южной оконечности полуострова расположен город Владивосток, являющийся самым крупным южным портом на тихоокеанском побережье России (рис. 1).



Рис. 1. Полуостров Муравьева-Амурского

Основными источниками загрязнения прибрежных вод полуострова Муравьева-Амурского являются городские порты, судоремонтные заводы, маломерный и крупнотоннажный флот, а также сбросы производственных, коммунально-бытовых, сельскохозяйственных предприятий, стоки дождевых и талых вод. Часть загрязняющих веществ попадает в море со стоком рек, куда в свою очередь стекают отходы различных предприятий. При этом значительная часть сбросов (неочищенных или недостаточно очищенных) поступает непосредственно в прибрежные воды, т.е. прилегающие акватории используются в качестве естественных резервуаров для нечистот. Такая ситуация возникла в

связи с отсутствием эффективной системы очистных сооружений на территории полуострова.

Исследование экологического состояния прибрежных вод полуострова Муравьева-Амурского проводилось по данным наблюдений Центра мониторинга загрязнения окружающей среды Примгидромета и институтов ДВО РАН за период с 2006 по 2009 гг. [1, 2].

Качество прибрежных вод г. Владивостока за рассматриваемый период ухудшилось, несмотря на снижение уровня загрязнения по некоторым показателям.

Так, с 2006 по 2008 гг. наблюдался небольшой рост уровня загрязнения прибрежных вод нефтепродуктами. В бухте Золотой Рог максимальные концентрации НП превысили ПДК в 14,4-17,6 раза, в бухте Диомид – в 14,8 раза, в проливе Босфор Восточный – в 18,4 раза, в Уссурийском заливе – в 4,2 раза, в Амурском заливе превышение составляло от 6,2 до 28,2 ПДК. В 2009 г. произошло снижение уровня загрязнения в бухтах Золотой Рог в 2,5 раза (по сравнению с 2008 г.), в бухте Диомид – в 3,7 раза, в проливе Босфор Восточный – в 1,8 раза и в Амурском заливе – в 2,9 раза. В Уссурийском заливе в 2009 г. наблюдался рост загрязнения нефтепродуктами в 1,2 раза.

Поверхность прибрежных вод по-прежнему покрывается нефтяной пленкой разной интенсивности. Процент покрытия акватории бухты Золотой Рог в 2006 г. составил от 40 до 100 % с интенсивностью 1-3 балла; в проливе Босфор Восточный – от 41 до 50 %; в Амурском заливе – от 71 до 80 %. В 2009 г. степень покрытия нефтяной пленкой в бухте Золотой Рог достигла 91-100 % с интенсивностью 1-5 баллов, в бухте Диомид от 71 % с интенсивностью 1-3 балла.

Содержание фенолов в прибрежных водах г. Владивостока в период с 2006 по 2007 гг. увеличилось в бухте Золотой Рог с 2,4 до 3,1 ПДК, в проливе Босфор Восточный – с 1,6 до 2,1 ПДК, в Амурском заливе – с 0,9 до 1,6 ПДК. В бухте Диомид и в Уссурийском заливе среднегодовые концентрации остались на уровне 2006 г. (2,1 и 1,2 ПДК соответственно). В 2008 г. содержание фенолов в прибрежных водах изменялось в диапазоне от 1,4 до 3 ПДК, максимальное значение было зафиксировано в бухте Золотой Рог (9 ПДК). В 2009 г. произошло снижение уровня загрязнения вод фенолами в бухте Золотой Рог и в проливе Босфор Восточный в 1,8 раза (что составило 1,7 и 1,8 ПДК соответственно), в Амурском и Уссурийском заливах в 1,6 раза (1,4 и 1 ПДК соответственно). В бухте Диомид среднегодовая концентрация фенолов почти не изменилась (2 ПДК).

Уровень загрязнения прибрежных вод ртутью постепенно увеличивается: в 2006 г. среднегодовая концентрация во всех районах колебалась в диапазоне 0,3-0,4 ПДК, а в 2009 г. в диапазоне 0,4-1 ПДК. При этом максимальные значения концентрации ртути в бухтах Золотой Рог и Диомид, в Амурском заливе и проливе Босфор Восточный достигли уровня высокого загрязнения.

Отмечен незначительный рост среднегодовых концентраций АПАВ: в 2006 г. диапазон значений составлял 0,3-0,8 ПДК, в 2008 г. – 0,5-1 ПДК, в 2009 г. – 0,5-1,3 ПДК.

За рассматриваемый период среднегодовое содержание тяжелых металлов (меди, железа, цинка, свинца, марганца и кадмия) в основном было менее 1 ПДК. Максимальные концентрации в 2009 г. наблюдались по меди в бухте Золотой Рог и проливе Босфор Восточный в количестве 2 и 1,2 ПДК соответственно; по цинку – в бухте Золотой Рог (1,7 ПДК), проливе Босфор Восточный (5 ПДК) и в Уссурийском заливе (8,5 ПДК); по растворимому железу – в бухте Золотой Рог (12 ПДК) и в проливе Босфор Восточный (1,1 ПДК); по кадмию – в бухте Золотой Рог (2 ПДК), в проливе Босфор Восточный (1,3 ПДК) и в бухте Диомид (2,4 ПДК).

С 2006 по 2008 гг. был отмечен рост среднегодовых концентраций хлорорганических пестицидов, в 2009 г. значительных изменений не зафиксировано. При этом среднегодовое содержание α -ГХЦГ и γ -ГХЦГ в рассматриваемых районах не превышало 0,1 ПДК; в 2009 г. максимальная концентрация α -ГХЦГ – 0,6 ПДК наблюдалась в Уссурийском заливе, γ -ГХЦГ

– 1 ПДК в бухте Золотой Рог. Максимум по ДДТ и ДДЭ наблюдался в Уссурийском заливе – 1 и 1, ПДК соответственно; по ДДД в проливе Босфор Восточный – 1,8 ПДК.

Кислородный режим в прибрежных водах за рассматриваемый период был удовлетворительным. Среднее содержание растворенного кислорода в толще вод находилось в диапазоне 8,06-9,71 мг/л. Ухудшение, как обычно, отмечалось в летний период года. Так, в 2007 г. было отмечено 35 случаев снижения концентраций растворенного кислорода ниже 6 мг/л (17 случаев в бухте Золотой рог, 8 – в проливе Босфор Восточный, 9 – в Амурском заливе и 1 – в Уссурийском заливе); в 2008 г. – 20 случаев (8 случаев в бухте Золотой Рог, 3 – в проливе Босфор Восточный, 8 – в Амурском заливе, 1 – в бухте Диомид); в 2009 г. – 27 случая (15 – в бухте Золотой Рог, 7 – в Амурском заливе, 4 случая в проливе Босфор Восточный, 1 - в Уссурийском заливе).

По рассчитанному индексу загрязненности воды в 2009 г. качество прибрежных вод в большинстве рассматриваемых районах улучшилось (таблица 1).

Таблица 1. Индекс загрязненности прибрежных вод за 2006-2009 гг.

Район	2006 г.		2007 г.		2008 г.		2009 г.	
	ИЗВ	класс	ИЗВ	класс	ИЗВ	класс	ИЗВ	класс
Амурский залив	1,00	III	1,73	IV	1,91	V	1,11	III
Бухта Золотой Рог	1,80	V	2,37	V	3,26	VI	1,79	V
Бухта Диомид	1,71	IV	1,94	V	2,88	V	1,55	IV
Пролив Босфор Восточный	1,42	IV	1,64	IV	2,80	V	1,54	IV
Уссурийский залив	1,16	III	0,59	III	1,68	IV	1,71	IV

В донных отложениях продолжают увеличиваться концентрации нефтяных углеводородов и фенолов. В 2009 г. среднее содержание НУ изменялось в пределах 0,11-6,66 мг/г сухого вещества, фенолов – 3,53-5,88 мкг/г. Максимальные концентрации обнаружены в бухте Золотой Рог (НУ – 13,61 мг/г, фенолы – 7,9 мкг/г).

Соединения токсичных металлов (медь, кадмий, свинец, ртуть) в донных отложениях бухт Золотой Рог и Диомид значительно выше, чем в других прибрежных районах полуострова Муравьева-Амурского. Среднегодовая концентрация меди в 2006 г. в этих бухтах равнялась 3,4 и 8,8 ДК, а в 2009 г. – 3,8 и 13,3 ДК соответственно; превышение ДК по кадмию в 2006 г. составляло 3,0 и 4,8 раза, в 2009 г. – 3,1 и 10,3 раза соответственно; по цинку в 2006 г. – 1,6 и 2,5 раза, в 2009 г. – 1,9 и 3,8 раза соответственно; по свинцу в 2006 г. – 1,4 и 2,7 раза, в 2009 г. – 1,6 и 2,8 раза соответственно; по ртути в 2006 г. – 1,9 и 5,4 раза, в 2009 г. – 2,6 и 3,9 раза соответственно.

Содержание α -ГХЦГ в пробах донных отложений бухт Золотой Рог и Диомид в 2006 г. в среднем достигало 2,1 и 10,5 нг/г соответственно, в 2008 г. – 11,5 и 10,4 нг/г соответственно; концентрация γ -ГХЦГ в 2006 г. насчитывала 0,4 и 0,9 нг/г, в 2008 г. – 3,3 и 14,0 нг/г соответственно. В 2009 г. произошло снижение концентраций α и γ -ГХЦГ в 1,9-2,2 раза. Максимальные концентрации хлорорганических пестицидов группы ДДТ и ДДЭ в бухте Золотой Рог в 2006 г. достигали 25 и 31 нг/г соответственно, в 2007 г. – 58,4 и 43,2 нг/г соответственно, в 2008 г. – 100,3 и 64,1 нг/г соответственно, в 2009 г. – 19,2 и 32,8 нг/г соответственно. Максимальная концентрация ДДТ в бухте Диомид наблюдалась в 2008 г. и составляла 118,9 нг/г (в 2006 г – 14 нг/г, в 2007 г. – 68 нг/г).

В 2009 г. почти в 3 раза увеличилась среднегодовая концентрация γ -ГХЦГ в донных отложениях Амурского и Уссурийского заливов (6 ДК), в проливе Босфор Восточный среднегодовая концентрация осталась на уровне предыдущего года – 6 ДК. Среднегодовая концентрация группы ДДТ превысила допустимый уровень в Амурском заливе в 2,24 раза, в проливе Босфор Восточный в 3,6 раза.

Концентрация железа в донных отложениях всех исследуемых районов в 2009 г. была высокой: максимальная концентрация в Амурском заливе составила 77895 мкг/г, в Уссурийском заливе – 62060 мкг/г, в бухте Золотой Рог – 54550 мкг/г, в бухте Диомид – 48893 мкг/г, в проливе Босфор Восточный – 52033 мкг/г.

По результатам проведенного исследования можно заключить, что несмотря на улучшение качества воды по некоторым показателям, прибрежные воды полуострова Муравьева-Амурского продолжают подвергаться антропогенному воздействию. Донные отложения аккумулируют загрязняющие вещества, которые становятся источником вторичного загрязнения прибрежных морских вод. Таким образом, развитие промышленности на побережье и отсутствие эффективных очистных сооружений снижает способность водных масс к самоочищению и тем самым приводит к ухудшению рыбохозяйственного значения прибрежных акваторий, к снижению их рекреационной ценности. Надеемся, что введение в строй новых очистных сооружений г. Владивостока постепенно улучшит экологическое состояние прибрежных вод.

Литература

1. Коршенко А.Н., Матвейчук И.Г., Плотникова Т.И., Удовенко А.В. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2007. – Обнинск: «Артифлекс», 2009. – 160 с.
2. Официальный сайт Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: <http://www.primgidromet.ru>
3. Природопользование, состояние и тенденции изменений морской среды прибрежных районов России в Японском море // Информационные ресурсы ТОИ ДВО РАН. Океанография. 2010. Т.11. URL: <http://www.pacificinfo.ru/data/cdrom/11/index.html>

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ МОНИТОРИНГА РАДИОАКТИВНОГО ФОНА В ВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ С ПОМОЩЬЮ АНПА

В.А. Углеv¹, Г.Ф. Сердюков²

¹Центр прикладных исследований СФУ
662971, Железногорск, ул. Кирова, 12а, e-mail: uglev-v@yandex.ru

²Хакасский государственный университет
655000, Абакан, ул. Ленина, 90, e-mail: sgf11@yandex.ru

Рассматриваются проблемы и перспективные решения организации эффективного мониторинга морских акваторий на изменение содержания радиоактивных веществ с помощью микро-АНПА. Предлагается проводить мониторинг специально организованной группировкой АНПА, с их комплексной интеграцией с донными исследовательскими станциями.

Расположение атомных электростанций (АЭС) на берегу морей и рек всегда вызывает опасение как у населения, так и у экологов. Например, все АЭС в Японии находятся на побережье и подвержены абиогенному и антропогенному воздействию. Авария на АЭС Фукусима-1 в марте 2011 года, а затем сброс огромных объемов воды с радиоактивными изотопами (йод, цезий) в океан в апреле, показали, что последствия аварии будут носить глобальный долгосрочный характер³. В связи с этим возникает задача проведения эффективной экологической экспертизы, реализующей не только обследование и мониторинг акватории вблизи побережья Японии, но и на значительных расстояниях от нее, т.к. зона радиоактивного загрязнения расширяется не только с осадками и поверхностными течениями, но и с перемещением биомассы, донных течений, переноса аэрозолей (например, ветра KOSA). Данные исследования становятся актуальны для многих стран тихоокеанского бассейна, где структура течений, влияющая на распространение радиоактивных веществ в воде и на дне, сложна и неоднородна [1].

Систематические исследования такого масштаба, связанные с возможностью получить значительную дозу облучения, рационально проводить с привлечением *автономных необитаемых подводных аппаратов* (АНПА). Решение задачи мониторинга радиоактивного фона в водных акваториях средствами роботизированных систем имеет ряд преимуществ по сравнению с привлечением человека: автономность и методичность работы, систематичность сбора образцов, исключение людей из опасной среды, расширенные возможности восприятия радиационного фона и проведения гидрохимического анализа воды и пр. Но есть и проблемы, решение которых не позволяет эффективно использовать традиционные модели АНПА при обследовании акваторий на уровень радиационного загрязнения. Вот некоторые из них:

1. низкая скорость фиксации датчиками работа уровня радиоактивного излучения, за счет необходимости анализа значительных площадей и объемов воды для точечной оценки многочисленных участков акватории океана;

2. наличие в океанической среде различных течений, особенности движения которых существенно влияющих на показатели содержания радиоактивных веществ на различной глубине;

³ Следует также отметить, что в июле 2011 года на АЭС Фукусима-1 произошел мелтдаун, т.е. проплавление дна реактора и утечка топливных элементов в почву, тем самым резко увеличив возможность стока в океан долгоживущих и высокоактивных элементов, таких как уран и плутоний.

3. низкая энергетическая эффективность подводных аппаратов, не позволяющая реализовать длительную систематическую работу робота даже на ограниченной территории;

4. существенное различие условий сбора данных на различных глубинах (особенно по давлению и температуре);

5. необходимость дезактивации корпуса роботов и калибровки контрольно-измерительного оборудования.

Очевидно, что эти затруднения можно бы было частично решить, применяя лендеры [2] или сети датчиков. Первые, т.е. донные станции, позволяют вести систематический сбор данных на любой глубине, но полностью исключают получение объемной картины о состоянии радиоактивного фона того или иного участка (измерения покрывают только линию дно - поверхность) и не адаптированы для дезактивации. Сети датчиков или минироботов позволяют получить объемную картину и вполне решают проблему с энергообеспечением и терморегуляцией сети, но этот способ работы системы требует снижения уровня автономности и повышает степень присутствия человека при выполнении управляющих работ. Комбинированным решением являются океанические исследовательские сети [3], но и они не предназначены для обследования акваторий с высоким содержанием радиоактивных веществ. Данные решения нельзя считать полноценными автономными подводными аппаратами, во многом ограниченными своей статичной структурой и пространственной привязкой к конкретному участку шельфа.

Развитие такого направления в подводной робототехнике, как микро-НПА⁴ позволяет по-другому подойти к решению задачи мониторинга. Их главные преимущества – это маневренность, автономность, относительная дешевизна в реализации. Сами по себе микро-НПА сохраняют базовые сложности при эксплуатации: проблематичность осуществлять сложный химический анализ проб (например, проведение высокомолекулярного исследования); неудобства технического обслуживания и подзарядки аккумуляторных батарей. Но если множество микро-роботов свести в единый комплекс, сформировав динамичную группировку на подобию пчелиного роя, то проблема измерения физико-химических характеристик и проб морской воды в пространстве, т.е. с учетом течений, становится осуществима. Каждый робот снабжается измерительными приборами, фиксирующими концентрации α -, β - и γ -излучения, а также активность распада изотопов в беккерелях, носителями информации и устройствами приема/передачи. Базовые характеристики микро-НПА, входящих в рой, представлены на рис. 1. Можно выделить ряд устойчивых архитектурных решений, позволяющих организовать системные взаимодействия в рое между микро-НПА:

- каждый робот является типовым завершенным, полнофункциональным и независимым элементом группировки, что предполагает наличие собственного хранилища информации об измерениях, алгоритмы маневров и координации движений в рое линейны и предполагают заранее определенные конфигурации роя (минимальный обмен информацией между роботами; передача данных по всплытию или прибытию на базу; рис. 2, а);

- каждый робот является типовым завершенным и полнофункциональным элементом группировки, действующем внутри единого роя, что также предполагает наличие собственного хранилища информации об измерениях, а так же интеллектуальных алгоритмов планирования и координации движений в рое (обмен информацией между роботами для координации перемещений; передача данных по всплытию и погружению; рис. 2, б)⁵;

⁴ Подводными аппаратами класса микро, согласно классификации из [4], являются такие подводные роботы, сухая масса которых не превышает 20 кг.

⁵ Такую и более развитые архитектуры рационально реализовать с помощью таких методов искусственного интеллекта, как многоагентные системы (взаимодействие аппаратов в рое), экспертные системы, генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети (задачи планирования траектории и принятия решений).

- каждый робот является представителем группы, осуществляющей сбор данных и ее передачу на специализированного центрального робота, выполняющем внутри роя функцию ядра (обмен информацией между роботами для координации перемещений и с центром - передача данных; по всплытию передает данные только центральный робот; рис. 2, в)⁶;

- каждый робот является типовым представителем группы, осуществляющей сбор данных и ее передачу на специализированного центрального робота не на прямую, а через обмен сообщениями с соседними элементами роя (обмен информацией между роботами для координации перемещений, и с центром и между собой; по всплытию передает данные только центральный робот; рис. 2, г).

Очевидно, что при достаточном количестве роботов, осуществляющих сбор данных, в группировке, возможна реализация формы роя как в виде пространственных фигур⁷ (сеть, тор, сфера и пр.), так и в виде динамической адаптивной структуры, отвечающей особенностям конкретного рельефа, течений, турбулентных потоков. Исходя из этого, можно выделить требования, которым должны соответствовать роботы, включенные в группировку:

- максимальное время полезной работы (в данном случае, это регистрация излучений);
- максимальный объем единовременного охвата роем обследуемой жидкости;
- максимальный охват обследуемой акватории;
- максимальная скорость перемещений при перестройки формы роя;
- минимальное время всплытия или возвращение на базу;
- максимальное время работы от аккумуляторных батарей;
- минимальная стоимость каждого модуля робототехнической системы⁸.

Все это предполагает решения следующих проблем, стоящих перед АНПА:

- повышение прочностных характеристик корпуса микро-НПА, связанная с необходимостью погружения и работы на значительных глубинах. Существующая сегодня для микро-роботов глубина в 500-1000 метров [4] может быть преодолена за счет применения новейших композитных и наноматериалов, а так же за счет варьирования формы аппаратов;

- энергетическая эффективность аккумуляторных батарей существенно снижается при снижении температуры работы аппарата. Она может быть повышена за счет применения внутреннего термонагрева и эффективной термоизоляции, а так же сменных модулей питания или подзарядки от ресурсов центрального робота;

- калибровка измерительных приборов должна происходить систематически и без влияния ранее произведенных замеров, учитывая процессы осаждения радиоактивных веществ на корпусе и измерительном оборудовании АНПА. Решением данной проблемы, на наш взгляд, должны стать специально организованные калибровочные ванны;

- поверхность роботов и измерительного оборудования нуждаются в дезактивации. Для этого рационально предусмотреть возможность замены модулей обшивки робота и датчиков, а так же их дезактивация (как на поверхности, так и в режиме автоматического подводного обслуживания);

- требуется исследование влияния формы роя на эффективность измерения радиоактивного излучения для различных форм и комбинаций течений;

⁶ В данной конфигурации центральный робот может выполнять как чисто вспомогательные функции (внешний накопитель данных), так и служить интеллектуальным управляющим центром роя (функции управления)

⁷ Фигура может быть составлена как за счет построения роботов в рое на определенной дистанции друг от друга, так и при непосредственной стыковке, образуя «жесткую» форму.

⁸ Исходя из специфики задачи, решаемой микро-НПА, его поверхность может получить такую дозу радиации, после которой дезактивация будет нерентабельна (например, в случае наведенной активности) и всего робота логичней будет затопить в местах повышенной концентрации радионуклидов.

- требуется разработка эффективных управляющих алгоритмов, позволяющих минимизировать затраты энергии на этап подъем/погружение или «умную» подзарядку на глубине.

Решением части обозначенных проблем могла бы стать подводная многоцелевая донная станция, позволяющая вести обслуживание АНПА специальными роботами в автономном режиме работы. При этом группировка микро-НПА осуществляет свои функции на определенном участке шельфа, а затем возвращается на одну из станций, где происходит подзарядка батарей, информационный обмен. Очевидно, что модуль дезактивации роботов необходимо делать в виде отдельного блока [5], отстоящего на некотором расстоянии от станции, либо предусмотреть подъем сильно облученных механизмов для физической и химической дезактивации на специализированно оборудованных для этого кораблях. Такая станция предполагает организацию совместной работы различных видов роботов по формированию замкнутой ниши, решающей задачи научных исследований, ресурсообеспечения и обслуживания.

Существующее состояние экологической обстановки в прибрежных зонах океанов и последние тенденции технического прогресса свидетельствуют, что задача мониторинга шельфа на предмет загрязнения радиоактивными элементами является и будет оставаться актуальной. Это то направление, где применение автономных необитаемых подводных аппаратов востребовано и может быть успешно осуществлено. Развитие робототехники в данном направлении, включая разработку специализированных «интеллектуальных» сообществ роботов, не смотря на наличие ряда проблем, найдет практическое применение как для решения текущих, так и для решения более амбициозных задач освоения океанов.

Литература

1. Bo Qiu, Shuiming Chen, Peter Hacker, Nelson G. Hogg, Steven R. Jayne, Hideharu Sasaki. The Kuroshio Extension Northern Recirculation Gyre: Profiling Float Measurements and Forcing Mechanism // *Journal of Physical Oceanography*, 2008. P. 1-38.
2. Малашенко А.Е., Перунов В.В. Глубоководные донные автономные станции в радиогидрофизических комплексах мониторинга акваторий // *Подводные исследования и робототехника*. 2010. №1(9). С. 53-57.
3. Проект NEPTUNE (<http://www.interactiveoceans.washington.edu/story/NEPTUNE+Concept>)
4. Бочаров Л.Ю. Анализ тенденций развития исследований и разработок в области создания подводных микроаппаратов // *Нано- и микро-системная техника*. URL: <http://www.microsystems.ru/files/publ854.htm>.
5. Handbook on nuclear law: implementing legislation / Carlton Stoiber... [et al.]. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2010.



Рис. 1. Классификации входящих в рой микро-НПА по некоторым техническим характеристикам

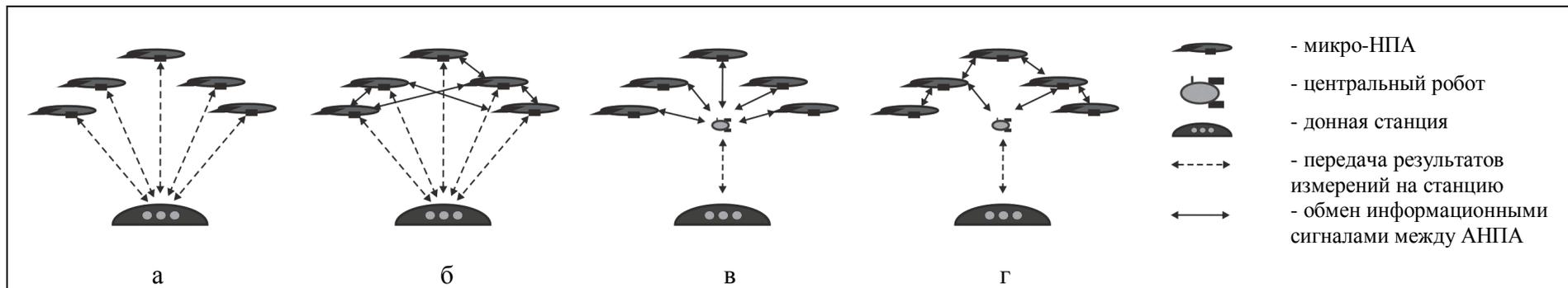


Рис. 2. Базовые конфигурации роя

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ *IN SITU* СПЕКТРОФОТОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НИТРАТОВ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Д.Д. Каплуненко, В.Б. Лобанов, В.И. Звалинский, П.Я. Тищенко

Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический институт им.
В.И. Ильичева (ТОИ ДВО РАН)
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, e-mail: dimkap@poi.dvo.ru

Рассматриваются проблемы и возможности применения прибора MBARI-ISUS V3, применяемого для ультрафиолетовой (УФ) спектрофотометрии и позволяющего определять концентрации биогенных веществ в морской воде (*in situ*) при его соответствующей настройке. В данном исследовании определялась концентрация нитратов (NO₃), растворенных в морской воде при зондировании до глубины 1000 м. Временные зависимости концентрации нитратов при вертикальном зондировании были преобразованы в зависимые от глубины концентрации с использованием данных гидрологического зонда SBE-911, совместно с которым в автономном режиме выполнялось зондирование. Полученные результаты сопоставлялись с данными химических анализов, выполненных как в рейсах при использовании MBARI-ISUS, так и выполнявшимися ранее в тех же районах Японского моря. Результаты измерений и их анализ показывают, что данный прибор позволяет получать новую информацию о структуре водных масс и физических явлениях, понимание которых может оказаться возможным с использованием методов УФ спектрофотометрии *in situ*.

1. Введение

В настоящее время исследование компонентов экосистем, в частности, состава среды прибрежных и открытых акваторий моря является важной задачей современной океанографии. Одной из таких задач является измерение содержания в морской среде минеральных форм биогенных и загрязняющих элементов. Повсеместная эвтрофикация эстуариев рек и прибрежных акваторий требует экспрессных массовых измерений биогенных элементов (нитратов, нитритов, фосфатов, CO₂, кислорода и т.д.), а также сероводорода, опасное заражение которым сопровождается гипоксия эвтрофированных акваторий. Используемые в большинстве случаев химические методы весьма трудоемки, что затрудняет проведение массовых измерений и делает невозможным измерения *in situ*. В последнее время началось промышленное производство приборов достаточно высокого качества для измерений ряда биогенных элементов среды *in situ*. К таким приборам относится подводный зондирующий УФ спектрофотометр, изготовленный Институтом Аквариума Бухты Монтерей, MBARI-ISUS V3 (Monterey Bay Aquarium Research Institute, In Situ Ultraviolet Spectrophotometer, ISUS, модификация 3, рис. 1). В частности, этот прибор способен измерять содержание нитратов с точностью около 2 мкМ, воспроизводимостью 0.05 мкМ и временем сканирования менее 1 с. Прибор отличается высокой стабильностью в течение длительного времени, что позволяет его использовать как при буйковых постановках, так и при глубоководном зондировании (Johnson, Colletti, 2002).



Рис. 1. Общий вид УФ спектрофотометра (датчик нитратов ISUS V3)

Выбор методов УФ спектрофотометрии для выполнения наблюдений *in situ* за содержанием в морской среде растворенных неорганических компонентов обусловлен их способностью поглощать свет в УФ области спектра в диапазоне длин волн < 280 нм (Buck et al., 1954). Спектр поглощения этих веществ приведен на рис. 2.

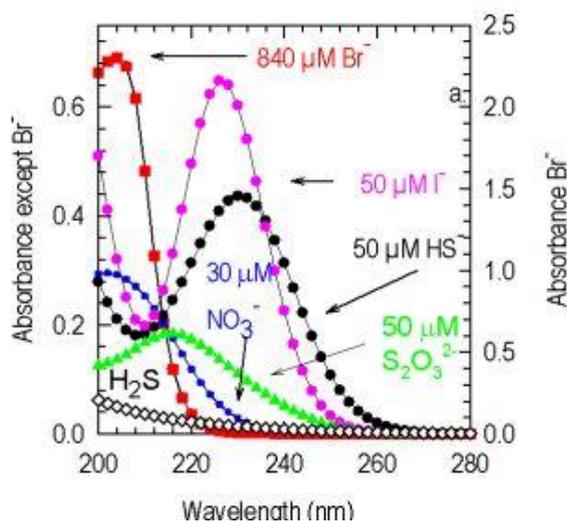


Рис. 2. Спектры поглощения бромидов, бисульфидов, нитратов и нитритов в концентрациях, типичных для морской среды. Каждая из солей при измерении эталонного спектра растворялась в обессоленной воде. Левая ось соответствует спектру поглощения бромидов, правая – для всех остальных солей (Johnson, Coletti, 2002)

2. Методы измерений и данные для анализа

Принцип работы прибора представляется следующим образом. Объем воды в измерительной ячейке облучается УФ светом дейтериевой лампы с помощью оптических волокон (рис. 3). Пройдя через образец воды луч света отражается от зеркала ячейки и вновь, пройдя через объем воды, возвращается на другое оптическое волокно и направляется на спектрограф. Разложенный в спектр свет попадает на экран с набором большого количества фотодиодов, каждый из которых соответствует определенной длине волны. Сканирование по спектру производится последовательным опросом фотодиодов. Спектральное разрешение составляет менее 1 нм, время опроса всех фотодиодов – менее 1 сек. Для компенсации возможных изменений интенсивности источника света предусмотрен луч сравнения с отдельным датчиком. В дальнейшем производится компьютерная обработка сигнала измерения и сигнала сравнения.

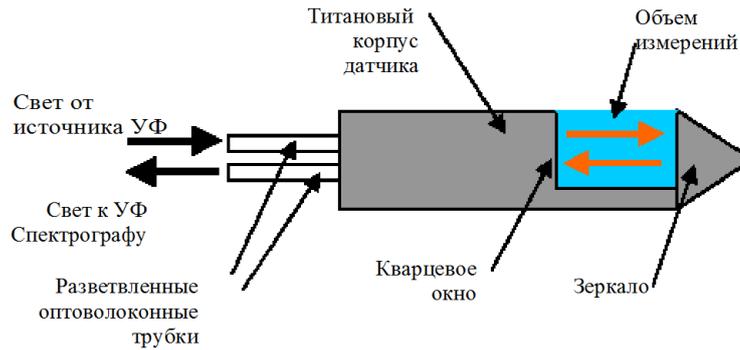


Рис. 3. Ячейка (датчик) для измерения концентрации нитратов (NO₃) MBARI-ISUS V3

УФ спектрофотометр предназначен для определения нитратов в пределах концентраций от 0.5 до 200 μM с точностью до $\pm 2 \mu\text{M}$ с воспроизводимостью до $\pm 0.05 \mu\text{M}$ на глубинах от 0 до 1000 метров. Одной из технических особенностей прибора ISUS является низкая частота опроса датчика (0.5 Гц, при стандартной частоте опроса зондов SBE-911 и SBE 9plus, используемых совместно, в 24 Гц), что связано с необходимостью накопления УФ приемником необходимого количества опросов для статистически достоверных измерений по всему измеряемому спектру. Для того чтобы данные измерений ISUS соответствовали задаваемому горизонту при совместном зондировании с имеющимся зондом, скорость вертикального зондирования не должна превышать 0.5 м/сек. Вместе с тем, особенности конструкции используемой в экспедиции лебедки, а также судовые условия не позволяли проводить вертикальное зондирование вниз со скоростью не менее, чем 0.8 м/сек. Таким образом, для анализа использовались данные, полученные при зондировании от дна к поверхности. Это позволяло преобразовывать данные из временной зависимости в глубинную (сам прибор не имеет датчика давления), а также более точно сравнивать результаты, полученные прибором с данными химического анализа, так как отбор проб в батометры также производится на участке измерений от дна к поверхности.

В данной работе анализируются результаты, полученные в рейсах при вертикальном профилировании в Японском море в трех рейсах НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2009-2010 г. и указанные на рис. 4.

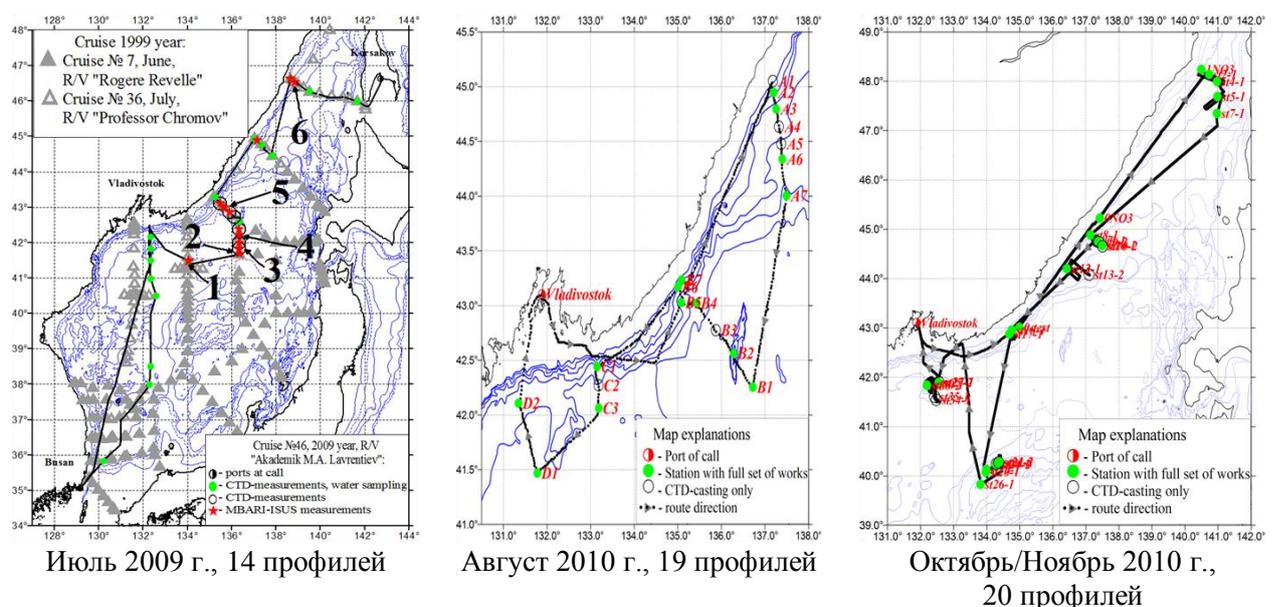


Рис. 4. Схема станций рейсов 1999 и 2009 гг., использованных для анализа содержания нитратов лабораторными и *in situ* методами

Данные зондирования сравнивались с результатами химических методов анализа нитратов. Для этих целей использовался метод Грисса в модификации Бендшнейдера–Робинсона (Bendschneider, Robinson, 1952) (раскрашивающие реактивы – сульфаниламид и нафтилэтилендиамин). Для восстановления нитратов использовалась батарея из трех медно-кадмиевых редукторов. Стабильность работы редукторов контролировалась ежедневно при пропускинии градуировочного раствора ($[\text{NO}_3^-] = 25 \text{ мкМ/л}$, фон – морская вода).

Калибровка определения нитратов выполнялась дважды (в начале и в конце выполнения измерений). Калибровочные растворы готовились на фоне безнитратной морской воды.

Такой подход позволил откалибровать получаемые зондом данные, которые, как было установлено, показывали заниженное содержание нитратов. При данных условиях измерений оказалось достаточно введения линейных уравнений калибровки.

4. Результаты и выводы

Измерения NO_3 подтвердили сложную структуру слоев фитопланктона (двойной максимум хлорофилла для различных районов Японского моря, как правило, для северо-западной части), которые соответствуют минимумам концентрации нитратов в соответствующем подповерхностном слое (рис. 5).

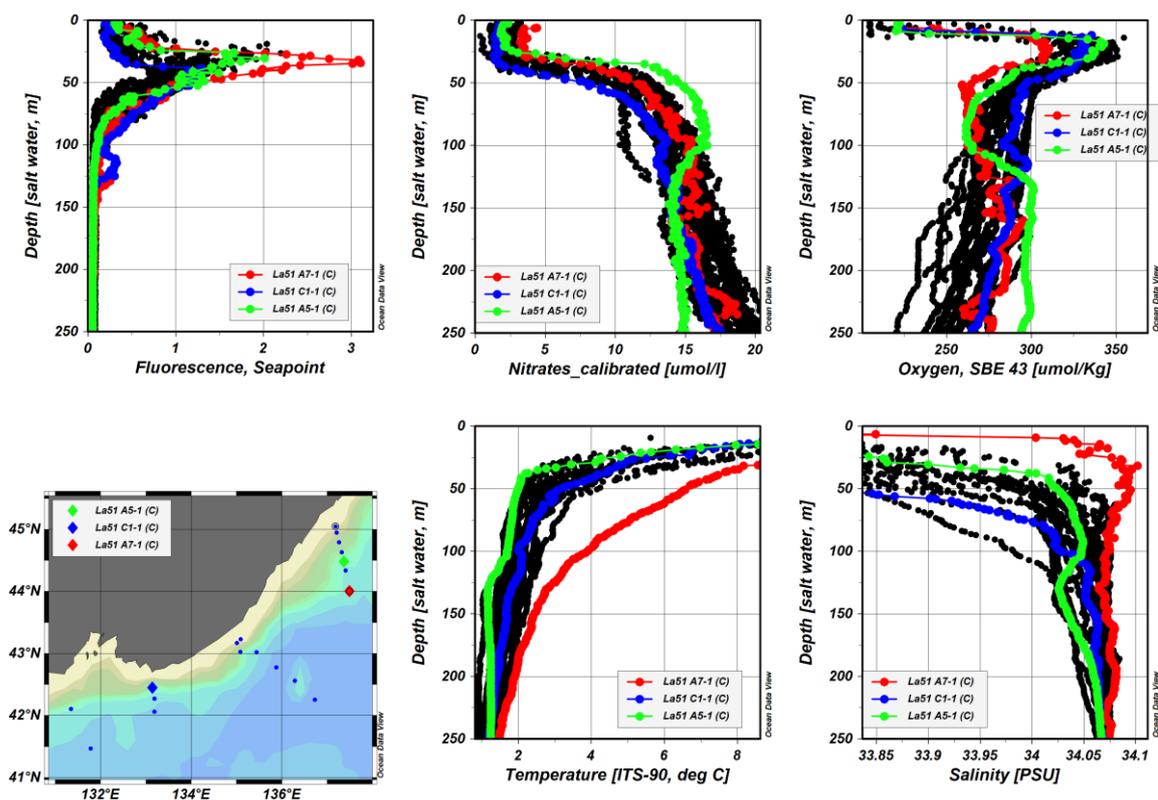


Рис. 5. Пример распределения хлорофилла (Fluorescence, Seapoint), нитратов (Nitrates_calibrated), кислорода (Oxygen, SBE 43), температуры (Temperature), солености (Salinity), полученных в рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» №51 в августе 2010 г. на глубинах до 250 м

При этом была обнаружена сложная ступенчатая структура профилей нитратов, которая не выявлялась при химическом анализе данных, полученных из батометров из-за малого количества точек. Такая ступенчатая структура, как видно из рис. 5, обратно соответствует структуре профиля кислорода (минимум кислорода – максимум нитратов и

наоборот). При этом видно, что концентрация нитратов в поверхностном слое максимальна под пикноклином и падает до нуля при переходе через него, что связано с повышенной биологической активностью в этом слое (рис. 6).

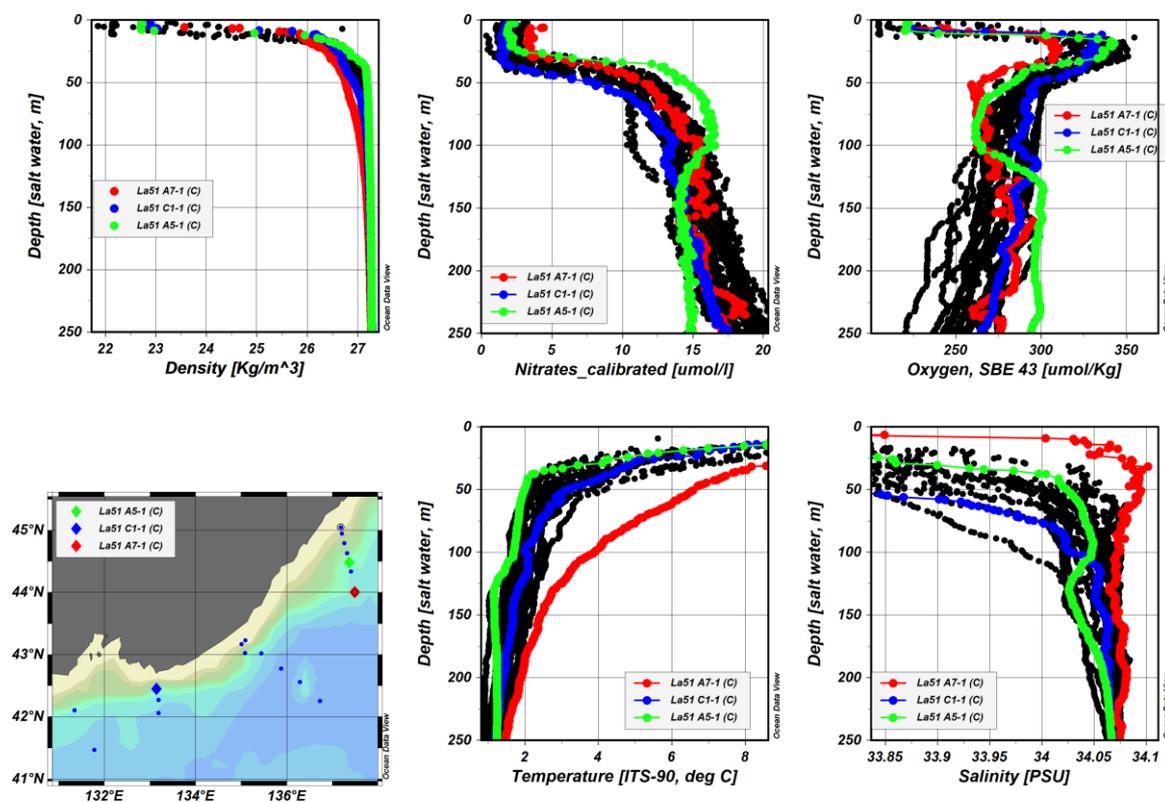


Рис. 6. Пример распределения плотности морской воды (Density), нитратов (Nitrates_calibrated), кислорода (Oxygen, SBE 43), температуры (Temperature), солёности (Salinity), полученных в рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» №51 в августе 2010 г. на глубинах до 250 м

В целом результаты рейсов показали, что использование MBARI ISUS позволяет получить детальную структуру нитратов при вертикальном профилировании, что было невозможным при использовании данных отбора проб батометрами. При этом анализ данных показывает, что данный прибор позволяет получать новую информацию о структуре водных масс, физических явлениях на глубинах до 1000 м, связанных с обменными процессами в водной толще и биологических процессах в подповерхностном слое.

Литература

1. Johnson K.S. and Coletti L.J. In situ ultraviolet spectrophotometry for high resolution and long-term monitoring of nitrate, bromide and bisulfide in the ocean // Deep-Sea Research. 2002. P. I, 49. P. 1291-1305.
2. Buck R.P., Singhadeja S., Rogers L.B. Ultraviolet absorption spectra of some inorganic ions in aqueous solutions // Analytical Chemistry. 1954. Vol. 26. P. 1240-1242.
3. Bendschneider K., Robinson R.I. A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water // J. Mar. Res. 1952. Vol. 11, № 1.
4. Operation Manual for MBARI-ISUS V3. Document Number SAT-DN-425. Satlantic Incorporated. 2009.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОВЕДЕНИЕМ РЫБ И БЕСПОЗВОНОЧНЫХ В РЫБОЛОВСТВЕ

М.Ю. Кузнецов

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр
(ФГУП ТИНРО-Центр)

690091, Владивосток, пер. Шевченко, 4, тел.: (423) 2401356,

e-mail: kuznetsovm@tinro.ru

Рассматриваются вопросы интенсификации рыболовства с использованием гидроакустических полей. Обсуждаются проблемы повышения эффективности акустических средств для управления поведением рыб. Обосновываются параметры акустических стимулов, перспективных для привлечения и концентрации рыб и хищных беспозвоночных. Приводятся результаты разработки и испытаний гидроакустических излучателей – имитаторов звуков рыб.

Одним из основных каналов связи и ориентации рыб в водной среде является звуковой канал. Современная наука накопила большое количество исходных данных о механизмах рецепции и ориентации морских гидробионтов. Исследования показали, что большинство видов рыб и некоторые морские беспозвоночные обладают развитой слуховой рецепцией, позволяющей им воспринимать звуки и определять направление на их источник в широкой полосе частот [1-3]. На рис. 1 представлены аудиограммы – зависимости слуховых порогов рыб от частоты звука. Диапазон воспринимаемых частот составляет у различных рыб от 20 Гц до 2000 Гц, чаще – до 1000 Гц, реже – до 4000 Гц. Максимальная (пиковая) слуховая чувствительность большинства промысловых видов рыб приходится на частоты 20-1000 Гц. В последние годы было доказано, что направленным слухом в диапазоне частот от 20 до 1500 Гц обладают многие головоногие, в частности осьминоги, каракатицы и некоторые виды кальмаров [4, 5].

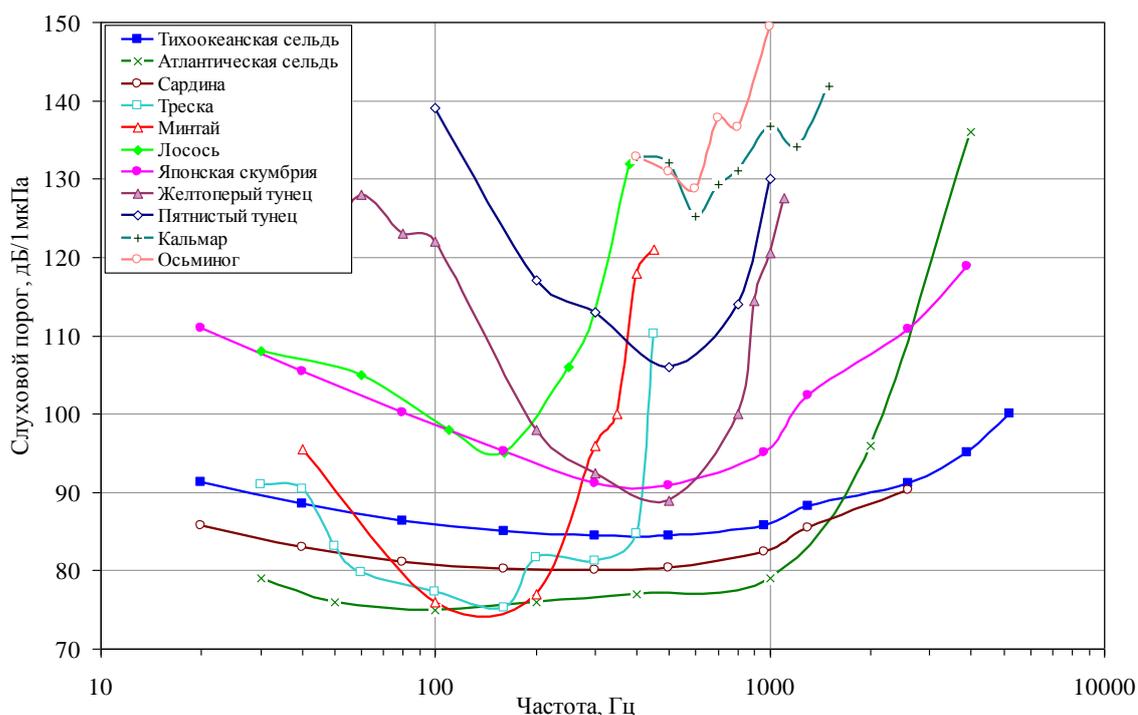


Рис. 1. Аудиограммы некоторых промысловых видов рыб и головоногих моллюсков

С другой стороны, акустические колебания в воде затухают гораздо слабее и распространяются на большие расстояния, чем в воздухе (особенно на низких частотах). Кроме этого, акустические свойства водной среды таковы, что для генерации в воде определенного уровня звукового давления требуются гораздо меньшие затраты энергии чем в воздухе. Эти очевидные преимущества подводных звуковых волн и наличие у головоногих моллюсков и рыб органов их восприятия, открывают весьма заманчивую перспективу использования акустического канала для управления поведением гидробионтов с позиций, прежде всего, дистантных возможностей и энергозатрат. Другие каналы связи и соответствующие им физические поля (световые и электрические) имеют в воде гораздо меньшие дистантные возможности и служат, в основном, для ближней ориентации гидробионтов [6].

История рыболовства насчитывает многочисленные попытки применения акустических сигналов для приманивания или отпугивания рыб [6, 7]. Однако до сих пор нет достаточно надежных и эффективных способов и средств управления поведением рыб с помощью акустических стимулов и их применение в промышленном рыболовстве крайне ограничено. Это связано, прежде всего, с неустойчивостью реакции рыб на звуковые сигналы. Часто наблюдается такая ситуация: при определенных модельных условиях рыбы активно реагируют на звук, а при других – сила реакции снижается или отсутствует вовсе.

Основная причина неустойчивости реакций рыб и ограниченности использования акустических средств привлечения и отпугивания рыб в практике рыболовства, на наш взгляд, связана с методологией предварительных (предшествующих разработке этих средств) биоакустических исследований. Как известно, определенную поведенческую реакцию можно вызвать, воздействуя на животное эффективными (значимыми для животного) стимулами [8]. Поэтому необходимо выбрать из большого числа внешних раздражителей ключевой стимул, удовлетворяющий внутренним потребностям организма и вызывающий у рыб адекватную двигательную реакцию. Слабая изученность причин (мотивов) и механизмов реакций промысловых объектов на те, или иные акустические стимулы приводит часто к переоценке возможностей звукового раздражителя в плане его использования для управления поведением рыб на фоне более значимых факторов биотического и абиотического характера.

Возьмем, например, звуки питания, которые чаще всего используются для привлечения рыб в различного рода акустических рыболовных приманках. Эффективность воздействия стимулов, имитирующих звуки питания или движения рыб, зависит, прежде всего, от физиологического состояния объекта, ритмов его пищевой, двигательной, нерестовой активности. Например, голодные рыбы положительно реагируют на звуки питания, сытые – безразлично. Другой пример: основные объекты прибрежного лова дальневосточных морей – лососи и сельди в преднерестовый период жизни (т.е. в период их массового промысла) практически не питаются, поэтому использование звуков кормления или движения объектов питания для привлечения этих рыб будет иметь крайне низкий эффект. Требуется целевая направленность исследований по определению и моделированию наиболее эффективных стимулов, вызывающих врожденные безусловнорефлекторные реакции у рыб при любых состояниях объекта, в т.ч. – в условиях промысла [3].

Наиболее хорошо изучено акустическое поведение парных рыб и групп рыб, ведущих семейно-территориальный образ жизни [9, 10]. Суточная звуковая активность стайных промысловых рыб исследовалась эпизодически и явно недостаточно, видимо, из-за сложности их содержания в аквариумах и редкой возможности длительной регистрации акустического поведения этих постоянно мигрирующих рыб в море. Кроме этого, большинство звуков рыб регистрировалось применительно к задачам шумопеленгации и распознавания подводных биологических объектов по их звукам безотносительно к

биологическому состоянию и сопутствующей поведенческой реакции рыб, и поэтому могут быть полезными лишь в познавательном плане [7, 11].

Нами исследована суточная акустическая активность стайных открытопузырных рыб: кеты *Oncorhynchus keta*, горбуши *Oncorhynchus gorbuscha*, тихоокеанской сельди *Clupea harengus pallasii*, дальневосточной сардины *Sardinops sagax melanosticta* и японского анчоуса *Engraulis japonicus* при различном их физиологическом состоянии и условиях содержания. Как показали исследования, сельдевые и лососевые отличаются высокой биоакустической активностью [12]. Установлено, что акустическое поведение этих рыб, имеющих связь плавательного пузыря с внешней средой, определяется в основном звуками, производимыми в результате истечения воздуха из плавательного пузыря с помощью мышц, окружающих плавательный пузырь, и специальных сфинктерных образований *ductus pneumaticus* и *ostium genitale* [13]. Причем, если другие звуки (разнообразные щелчки, треск и стуки), имеющие стридуляционное происхождение, обнаруживаются, в основном, в периоды активного движения и питания этих рыб, сигналы, сопровождающие процесс стравливания воздуха, присутствуют практически на всех стадиях развития открытопузырных рыб и повторяются независимо от физиологического состояния рыб, ритмов их пищевой, двигательной или нерестовой активности. Определен спектральный состав, временная структура и энергетические характеристики звуков рыб.

На рис. 1 представлены обобщенные спектрально-энергетические характеристики звуковых сигналов открытопузырных рыб, излучаемых при помощи плавательного пузыря. Как видно, спектры звуков имеют сходную форму и сосредоточены в двух определенных поддиапазонах (интервалах) частот с максимальной энергией спектра, соответственно каждому виду рыб. Основная энергия сигналов во время излучения перераспределяется в этих поддиапазонах от начала к концу сигнала. Наличие двух максимумов спектральной плотности в обобщенном спектре связано с особенностями звукообразования у открытопузырных рыб, имеющих плавательный пузырь и мышечный сфинктер [13].

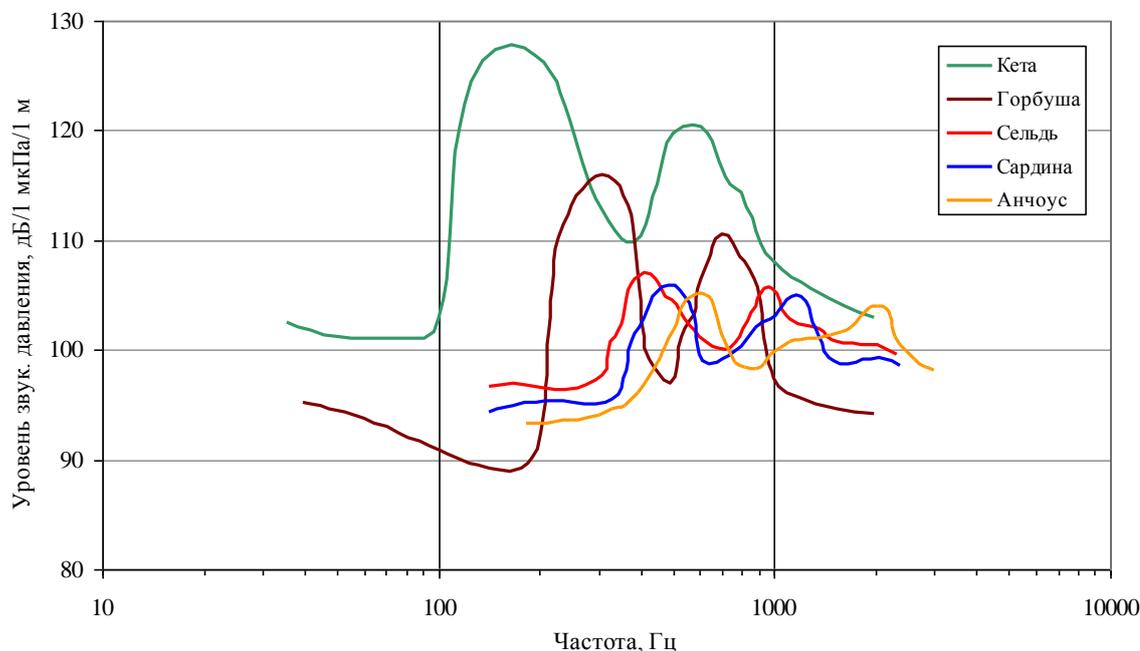


Рис. 2. Обобщенные спектрально-энергетические характеристики сигналов рыб

Установлена зависимость спектрального состава сигналов от размеров (вида) звучащего объекта (смещение спектральной энергии в область высших частот и снижение уровня сигналов с уменьшением размера рыб). Кроме этого выявлена, характерная импульсная структура сигналов с экспоненциальным спадом амплитуды в импульсах, а

также амплитудная модуляция сигналов в зависимости от размеров (вида) рыб и частотная модуляция (девиация частоты) в характерных зонах спектра от начала к концу сигнала.

Помимо технических параметров, характеризующих структуру сигналов открытопузырных рыб, установлено информационное (сигнальное) значение этих звуков. Наличие специальных органов звукообразования у открытопузырных рыб – плавательного пузыря и сфинктерных образований с развитой мускулатурой, стереотипность и повторяемость излучаемых с помощью этих органов звуков на всех стадиях развития рыб, а также усиление акустической активности рыб в условиях ограниченной видимости, например в ночное время суток (когда отсутствует зрительный контакт особей в стае), позволяет утверждать, что исследованные нами акустические сигналы по своему информационному содержанию являются сигналами 1-го порядка, т.е. служат средством поддержания внутривидового и межвидового контакта (связи) особей данного вида и являются для рыб безусловными раздражителями, вызывающими стереотипно-проявляющуюся реакцию привлечением к источнику звука других особей данного вида. Очевидно, что сигналы мелких открытопузырных рыб (анчоуса, сардины) одновременно служат приманкой для многочисленных хищников (хищных рыб, кальмаров и морских млекопитающих). Сигнальное значение этих акустических стимулов для рыб и кальмаров косвенно подтверждает сходство частотных диапазонов излучаемых рыбами звуков и воспринимаемых рыбами и головоногими моллюсками частот (рис. 1, 2), что предполагает высокую эффективность их воздействия на поведение рыб и кальмаров как адекватного стимула.

В результате анализа спектральных, энергетических и временных характеристик сигналов рыб, а также принимая во внимание участие плавательного пузыря в звукообразовании и характеристики слуховой чувствительности исследуемых открытопузырных рыб, выявлены основные параметры акустических стимулов, которые могут быть использованы для привлечения и концентрации рыб и хищных беспозвоночных (табл. 1).

Таблица 1. Параметры акустических сигналов для привлечения рыб и кальмаров

Вид	Длительность сигнала, с	Диапазон частот, Гц	Интервалы частот спектрального максимума, Гц*	Частотная модуляция (девиация частоты), Гц**	Амплитудная модуляция, Гц***	Уровень звукового давления, дБ/1 мкПа/1 м
Лососи больше 50 см	1,0±0,7	20-1000	100–200 450–700	100 250	6-14	124±4
Лососи меньше 50 см	0,6±0,2	20-1000	250–350 600–900	100 300	24-40	118±2
Тихоокеанская сельдь	0,8±0,3	50-2000	350–500 800–1200	150 400	35-55	112±2
Дальневосточная сардина	0,8±0,5	50-2000	400–550 1000–1400	150 400	45-55	108±3
Кальмары, анчоус, корюшка мойва и другие менее 20 см	1,0±0,5	50-2500	550–700 1800–2400	150 600	50-60	106±4

* Границы частот соответствуют глубинам порядка 3-5 м ниже поверхности моря и с повышением гидростатического давления должны быть уточнены в сторону увеличения.

** частотная модуляция означает плавное изменение частоты спектрального максимума от начала к концу сигнала в пределах выделенных интервалов спектра.

*** амплитудная модуляция – пульсации амплитуды сигнала глубиной 4-6 дБ с плавным нарастанием и экспоненциальным спадом амплитуды в импульсах.

Воспроизвести в водной среде акустические сигналы с указанными выше параметрами можно с помощью любого гидроакустического устройства, способного генерировать импульсные звуковые сигналы сложного спектра в диапазоне частот 20-3000 Гц с уровнем звукового давления до 20 Па/1м.

Наиболее часто для генерации звуков под водой используются электроакустические устройства. Излучатели и антенны на пьезокерамической основе традиционны в промышленной гидроакустике. И это является второй причиной низкой эффективности применения звуковых полей для управления движением рыб в рыболовстве.

Недостатком электроакустических преобразователей в данном случае является то, что такие устройства не обеспечивают широкополосность спектра излучаемых ими звуков, характерную для биологических сигналов рыб. Из-за резонансных свойств электроакустических преобразователей, устройства, созданные на их основе, оказываются малоэффективными, особенно в низкочастотной области спектра ниже 1 кГц, соответствующей области слуха большинства промысловых рыб и беспозвоночных. Низкочастотный резонанс может быть достигнут только при больших габаритах активного элемента преобразователя, что затрудняет его использование на промысле и, кроме того, предполагает высокую стоимость и электропотребление такого излучателя.

Поэтому в процессе разработки гидроакустических устройств для имитации сигналов рыб, предпочтение было отдано бионическому принципу построения звукоизлучающих систем с использованием для производства сигналов сжатого воздуха (в качестве источника энергии), резонансных воздушных полостей и упругих элементов по аналогии с природной моделью излучения звуков у открытопузырных рыб [13, 14].

Внешний вид имитаторов звуков рыб показан на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид имитаторов звуков рыб

Устройство позволяет генерировать под водой импульсные звуковые сигналы с заданными согласно табл. 1 параметрами, т.е. имитировать биологические сигналы открытопузырных рыб различного размерного и видового состава. Сходство с характеристиками биологических сигналов достигается за счет максимального приближения механизма генерации звука в имитаторе и в звукопроизводящих органах открытопузырных рыб [14].

Эффективность акустического воздействия сигналов имитаторов на поведение рыб была доказана в ходе поведенческих экспериментов и промысловых испытаний. В качестве объекта исследований использовались преднерестовые лососи (кета), нагульная тихоокеанская сельдь и сардина. В результате экспериментальных исследований было установлено следующее:

- предъявление сигналов имитатора звуков рыб вызывает усиление акустической и двигательной активности рыб в садке и сопровождается движением объекта к источнику звука (реакция привлечения) на расстояниях до 100 м (уровень значимости менее 0,05);
- сравнительная оценка двигательной реакции рыб в условиях открытого водоема показала способность рыб к локализации сигналов и наличие направленной реакции, сопровождающейся привлечением рыб с основных путей миграции к источнику звука;
- сумеречное поведение рыб характеризуется более выраженной реакцией, что, очевидно, связано с усилением функции акустического канала связи у рыб в темное время суток;
- сигналы имитаторов вызывают у рыб адекватную двигательную реакцию даже в условиях садкового содержания, т.е. являются для рыб безусловными раздражителями. Следует ожидать увеличения эффективной зоны действия имитаторов в условиях открытого водоема.

Разработаны способы применения излучателей на различных видах лова. В основу разработок положены результаты предыдущих экспериментальных исследований двигательного поведения рыб на акустические стимулы.

Испытания имитаторов на промысле горбуши показали повышение уловистости невода, оснащенного системой, на 80% при сравнении среднего улова экспериментального невода со средним уловом контрольными неводами, и на 320% при сравнении среднесуточных уловов экспериментального невода с действующей ПАС и без нее. На промысле проходной кеты при использовании ПАС в экспериментальном неводе получено соотношение уловов местной и проходной кеты (серебрянки) 2/3 вместо 3/2 в контрольных неводах, где большую часть уловов в период испытаний составляла местная (лошалая) кета.

Испытания системы на джиггерном лове тихоокеанского кальмара в заливе Петра Великого в 2006-2009 гг. показали увеличение производительности лова кальмара с использованием системы на 48-56 %.

Литература

1. Hawkins A.D. The hearing abilities of fish // *Hearing and sound communication in fishes*. – N. Y., 1981. – P. 109-138.
2. Popper A.N., Fay R.R., Platt C., Sand O. Sound detection mechanisms and capabilities of teleost fishes // *Sensory Processing in Aquatic Environments*. – N. Y.: Springer-Verlag, 2003. – P. 3-38.
3. Кузнецов Ю.А., Кузнецов М.Ю. Обоснование методов и средств промысловой биоакустики. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2007. – 339 с.
4. Komak S., Boal J.G., Dickel L., Budelmann B.U. Behavioural responses of juvenile cuttlefish (*Sepia officinalis*) to local water movements // *J. Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*. 2005. Vol. 38(2). P. 117–125.
5. Hu M.Y., Yan H.Y., Chung W.S., Shiao J.C., Hwang P.P. Acoustically evoked potentials in two cephalopods inferred using the auditory brainstem response (ABR) approach // *J. Comparative Biochemistry and Physiology*. 2009. Vol. 153 (Part A). P. 278–283.
6. Протасов В.Р. Поведение рыб. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 295 с.

7. Шишкова Е.В. Физические основы промысловой гидроакустики. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 247 с.
8. Мантейфель Б.П., Павлов Д.С., Ильичев В.Д., Баскин Л.М. Биологические основы управления поведением животных // Экологич. основы управл. поведением животных. М.: Наука, 1980. – С. 5-24.
9. Zelick, R., Mann D.A., Popper A.N. Acoustic communication in fishes and frogs // J. Comparative Hearing: Fish and Amphibians. Springer. New York, 1999. P. 363-411.
10. Ramcharitar J., Gannon D.P., Popper A.N. Bioacoustics of the family *Sciaenidae* (croakers and drumfishes) // Tran. Am. Fish. Soc., 2006. № 135. P. 1409-1431.
11. Непрошин А.Ю. Звукоиндикация и шумопеленгование рыб. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 158 с.
12. Кузнецов М.Ю. Акустическая активность некоторых видов дальневосточных рыб и обоснование параметров акустических стимулов для дистанционного воздействия на рыб // Известия ТИНРО. 2007. Том 150. С. 281-300.
13. Кузнецов М.Ю. Особенности акустической сигнализации и генерации звуков некоторых видов стайных открытопузырных рыб // Акуст. журнал. 2009. Том 55, № 6. С. 799-808.
14. Пат. № 2376758 РФ. Имитатор звуков рыб / М.Ю. Кузнецов. Опубл. 27.12.2009. 12 с.