СЕКЦИЯ 2

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

ОПЫТ РАБОТЫ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ СИНТЕЗИРОВАНИЯ И ФОКУСИРОВКИ

Б.А. Касаткин, Г.В. Косарев

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс: (4232) 432416,
e-mail: gor@marine.febras.ru

В докладе представлены результаты обследования прибрежных морских акваторий и глубоководных участков морского дна акустическим профилографом высокого разрешения разработанным в ИПМТ ДВО РАН. Приведены профилограммы дна на различных трассах. В качестве носителя акустического профилографа использовалось, как буксируемое устройство так и автономный подводный аппарат, Показана возможность применения алгоритмов синтезирование применительно к обработке профилографических данных с целью повышения разрешающей способности по горизонтальной дальности.

Акустическое профилирование является традиционным методом исследования геологического строения дна акваторий при решении разного рода научных и производственных задач. Использование низкочастотного профилографа, с ЛЧМ зондирующими сигналами, цифровой системой формирования зондирующего сигнала, сбора, отображения и обработки данных, разработанного в ИПМТ ДВО РАН для обследования рельефа дна и донных отложений, поиска объектов на дне и в толще дна подтвердило его высокие эксплуатационные возможности [1,2]. В качестве носителя акустического профилографа использовалось, как буксируемое устройство так и автономный подводный аппарат. Полоса рабочих частот профилографа от 2,5 до 8 кГц, Разрешающая способность при определении глубины залегания осадочных слоев не хуже 0.3 м.

Актуальным остаётся вопрос о разработке методов распознавания профилограмм - стратификации донных отложений. Знание физических свойств (пористости, плотности, скорости распространения волн, анизотропии скорости, поглощения волн) и их взаимосвязи необходимо при интерпретации результатов исследования характеристик морского грунта. Осадочные породы имеют различное происхождение , их толщина колеблется от нескольких сантиметров до сотен метров. В зависимости от плотности они делятся на рыхлые осадки (ил, глина, илистый и глинистый песок, водонасыщенный песок), полууплотненные (песок, мягко-пластичная глина, песчаная глина, рыхлый известняк) и уплотненные (сцементированный известняк, каменный обломочный материал).

Анализ амплитуд эхосигналов и их спектра позволяет выполнить оценку акустических характеристик грунта, на основании которых рассчитываются классификационные признаки, позволяющие отнести тип грунта к одному из классов. Количественный анализ эхосигнала заключается в оценке амплитуд сигналов (пиков огибающей эхо - трассы), отраженных от границы вода - дно и поддонных слоев.

В результате комплексного анализа классификационных признаков с учетом особенностей литологической структуры донных грунтов удается разделить морские осадки на следующие литологические группы: илы, глины, пески, скальный грунт. Для решения задачи по приблизительной классификации донных осадков, как правило, используют наработанную базу данных отраженных эхосигналов в комплексе с набранными грунтодобывающими приборами пробами грунта, информационными данными об осадках и породах с карт и отчетов проектов глубоководного бурения.

Основные акустические характеристики донных грунтов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Акустические характеристики донных грунтов

ТИП ГРУНТА		Коэффициент отражения	Плотность (г/см^3)	Скорость звука (км/сек)	Затухание (дБ/м•кГц)
Ил газонасыщенный		-0,3- -0,5	1.1-1.4	0.5-1.4	0.8-0.9
Ил жидкий		< 0,15	1.45-1.5	1.1-1.2	0.04
Ил глинистый		0,15-0,2	1.45-1.46	1.4-1.5	0.08-0.1
Ил с алевритом и песком		0,2 -0,27	1.41-1.48	1.6-1.7	0.2-0.3
Пески тонко и мелкозернистые		0,27-0,30	1.55-1.60	1.95-2.03	0.4-0.5
Пески крупнозернистые с гравием		0,30-0,35	1.515-1.557	1.86-2.11	0.7
Гравий		0,35-0,4	1.55-1.65	2.05-2.3	0.9
Глины мягкопластичные		0,25-0,30	1.4-1.6	1.5-1.88	0.2-0.4
Глины плотные		0,3-0,42	1.52-1.59	1.82-1.98	0.48-061
Выходы Коренных Пород	Скальные кристалл Скалн. осад. происх. Литоф. осад. породы	0,4 –0,62	>6.6 3.6-6.6 3.1-4.0	>2.9 2.35-2.9 2.4-2.7	0.05-0.4

Анализ амплитуд эхосигналов и их спектра позволяет выполнить оценку акустических характеристик грунта, на основании которых рассчитываются классификационные признаки, позволяющие отнести тип грунта к одному из классов. Количественный анализ эхосигнала заключается в оценке амплитуд сигналов (пиков огибающей эхо - трассы), отраженных от границы вода - дно и поддонных слоев.

В результате комплексного анализа классификационных признаков с учетом особенностей литологической структуры донных грунтов удается разделить морские осадки на следующие литологические группы: илы, глины, пески, скальный грунт. Для решения задачи по приблизительной классификации донных осадков, как правило, используют наработанную базу данных отраженных эхосигналов в комплексе с набранными грунтодобывающими приборами пробами грунта, информационными данными об осадках и породах с карт и отчетов проектов глубоководного бурения.

Профилирование мелководного участка проводилось в заливе Петра Великого, б. Троицы. АНПА двигался по поверхности со средней скоростью 1,1 м/с (2,1 узла). Длина обследуемого участка составляет 5237м. Геологическое строение бассейна залива и геоакустическая модель подробно представлены в работе [3].

На профилограмме (рис. 1) хорошо выделяются области со следующие типами грунтов: 1 - многослойные неконсолидированные илистые отложения (рыхлый кремнисто-глинистый осадок), заполняющие морские впадины бывшие некогда руслами рек, 2 - плотные осадочные породы (песчаник крупный алеврит); 3 - выходы скальных пород. На профилограмме четко видно второе отражение от дна в областях с типом грунта 2,3. Области, где имеются выходы скальных пород, подтверждены НЧ ГБО съемкой, которая проводилась одновременно с профилографической. На рис. 2 приведен фрагмент электронного планшета профилографа, привязанный к карте местности, показаны траектория движения АНПА при профилографической съемке. Координатные данные получены от комплексной навигационной системы АНПА. Фрагменты траектории движения АНПА, как, соответственно и на профилограмме, окрашены разным цветом соответственно

типу грунта на данном участке, типы грунта: 1 - илистые отложения; 2 - плотные осадочные породы; 3 - выходы скальных пород. На траектории, как и на профилограмме, имеются метки времени, соответствующие времени работы АНПА в этих точках.

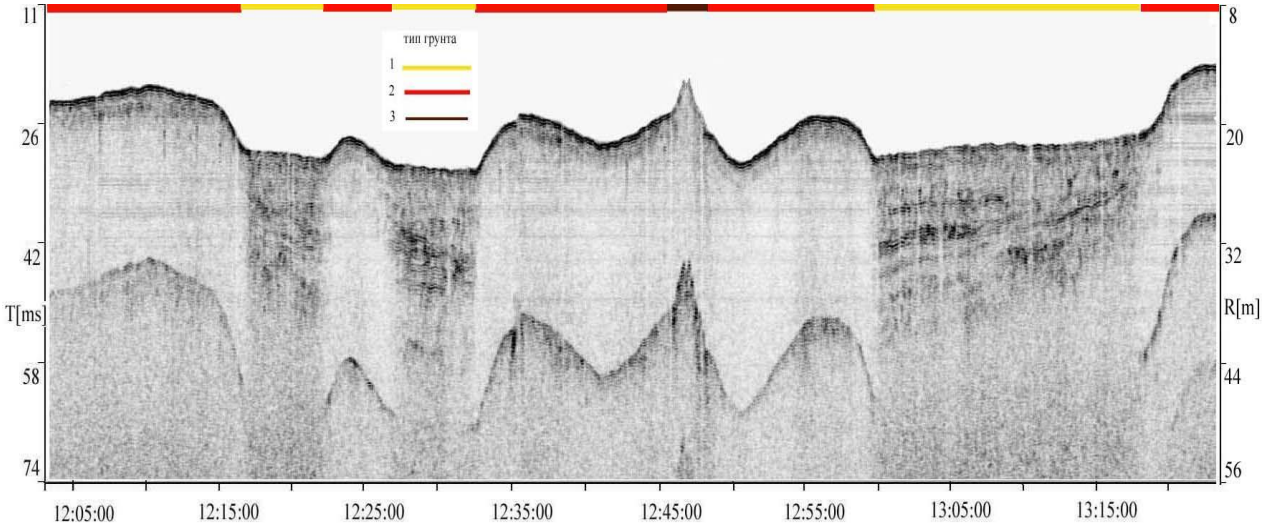


Рис. 1. Профилограмма дна залива Петра Великого, б. Троицы, общая длина обследуемого участка 5237м. АНПА двигался по поверхности, типы грунта: 1 - илистые отложения; 2 - плотные осадочные породы; 3 - выходы скальных пород.

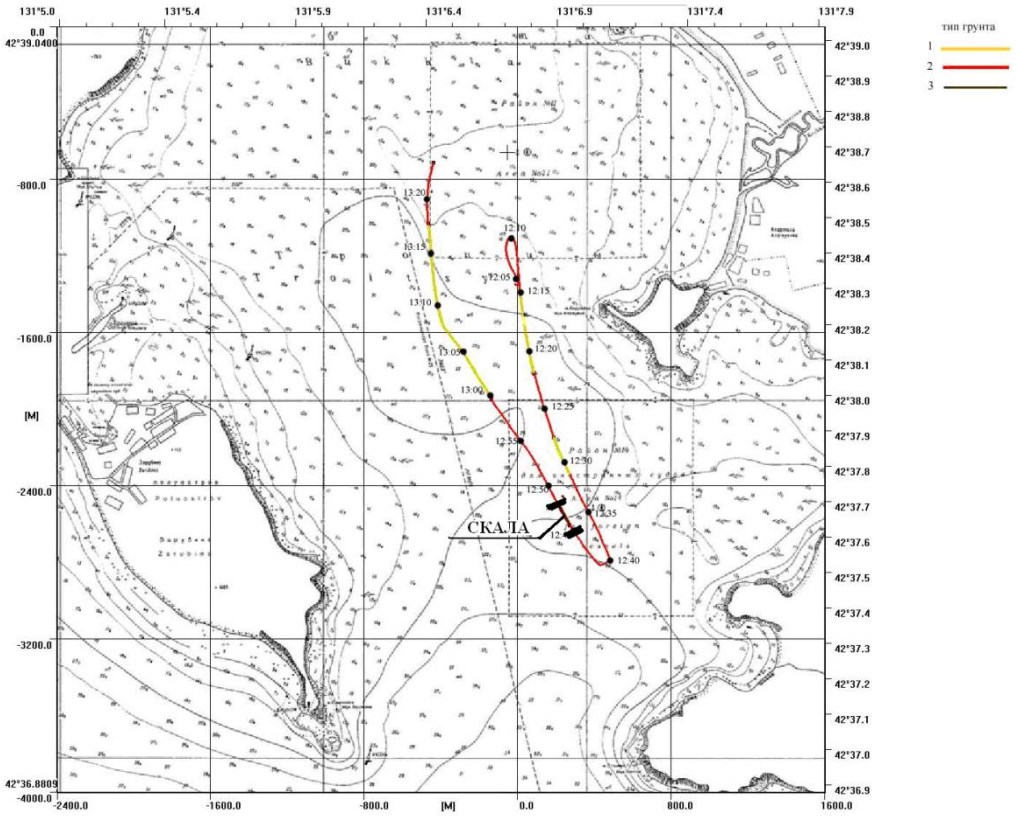


Рис. 2. Фрагмент электронного планшета профилографа. Показаны траектория движения АНПА при профилографической съемке дна залива Петра Великого, б. Троицы. Фрагменты траектории движения АНПА окрашены разным цветом соответственно типу грунта на данном участке, типы грунта: 1 - илистые отложения; 2 - плотные осадочные породы; 3 - выходы скальных пород.

На основании анализа полученных результатов, измеренные уровни амплитуд отраженных сигналов от рыхлого илистого осадка в 3.8 раза меньше чем от плотных осадочных пород и в 4.2 раза меньше чем от скальных пород. Полученные соотношения подтверждают соотношение данных приведенных в таблице 1. Таким образом, на основании приведенных результатов, можно приблизительно делать прогноз по литологическому составу грунта. Для наиболее полного анализа свойств грунта -гранулометрического и вещественного в соответствии с таблицей 1 необходимо иметь точно откалиброванный приемо-излучающий тракт и соответствующую ему базу данных.

На рис. 3 приведена профилограмма дна, полученная в глубоководном районе Японского моря (глубина моря 2830 м), АНПА двигался со средней скоростью 0,88 м/с (1,7 узла), общая длина обследуемого участка составила 2723 м. Тип грунта: илистые слоистые структуры с сильным поглощением акустического сигнала. На профилограмме заметны два основных слоя, между которыми возможны полости с водой, и выходы этих полостей на донную поверхность. Это подтверждается и данными ВЧ ГБО.

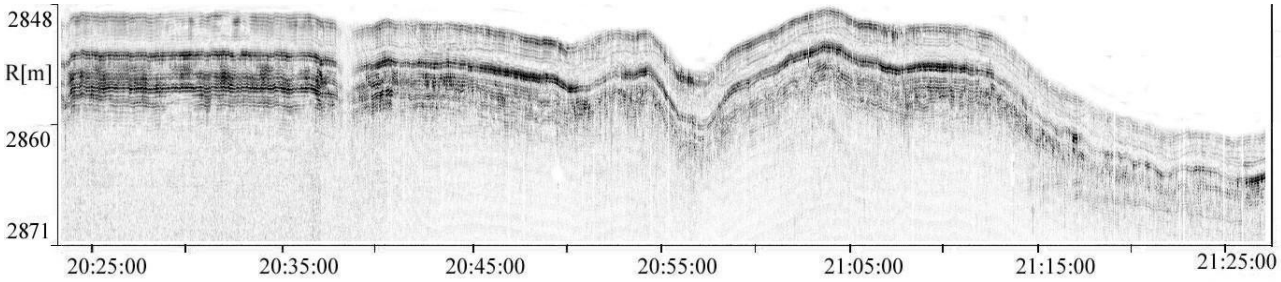


Рис. 3. Профилограмма дна, полученная в глубоководном районе Японского моря,. Тип грунта: илистые слоистые структуры с сильным поглощением акустического сигнала

Использование широкополосных импульсных излучаемых сигналов большой длительности позволяет существенно увеличить глубину зондирования морского дна, а применение корреляционных методов обработки таких сигналов позволило улучшить разрешающую способность по глубине. Разрешающая способность по горизонтальной дальности определяется шириной диаграммы направленности приемной и излучающей антеннами профилографа, которые в свою очередь зависят от геометрии антенны, частоты излучения и типа антенных модулей. Получение высокого разрешения по горизонтальной дальности, при использовании обычной антенны малого размера, возможно с помощью виртуальной антенны с синтезированной апертурой. Особенностью профилографической съемки является то, что носитель антенны профилографа движется с равномерной скоростью по прямолинейной траектории. Таким образом можно рассматривать искусственную антенную систему, состоящую из N рядом стоящих элементов как линейную решетку.

Алгоритмы синтезирования, используемые в радиолокационных системах нашли свое применение и в различных гидролокационных системах [4,5]. Исследование алгоритмов синтезирование применительно к обработке профилографических данных подробно описано в работе [6]. В работе [7] описан алгоритм синтезирования апертуры профилографа.

Для анализа эффективности применения методов синтезирования были использованы результаты измерений акустического профилографа, любезно предоставленные учеными из ТОИ ДВО РАН, со следующими характеристиками:

1. несущая частота 3.5 кГц;
2. период повторения зондирующих импульсов 100 мсек;
3. шириной диаграммы направленности приёмно-передающей антенны 55°;
4. частота квантования отраженного сигнала 25 кГц,
5. физический размер антенны 0.4 м

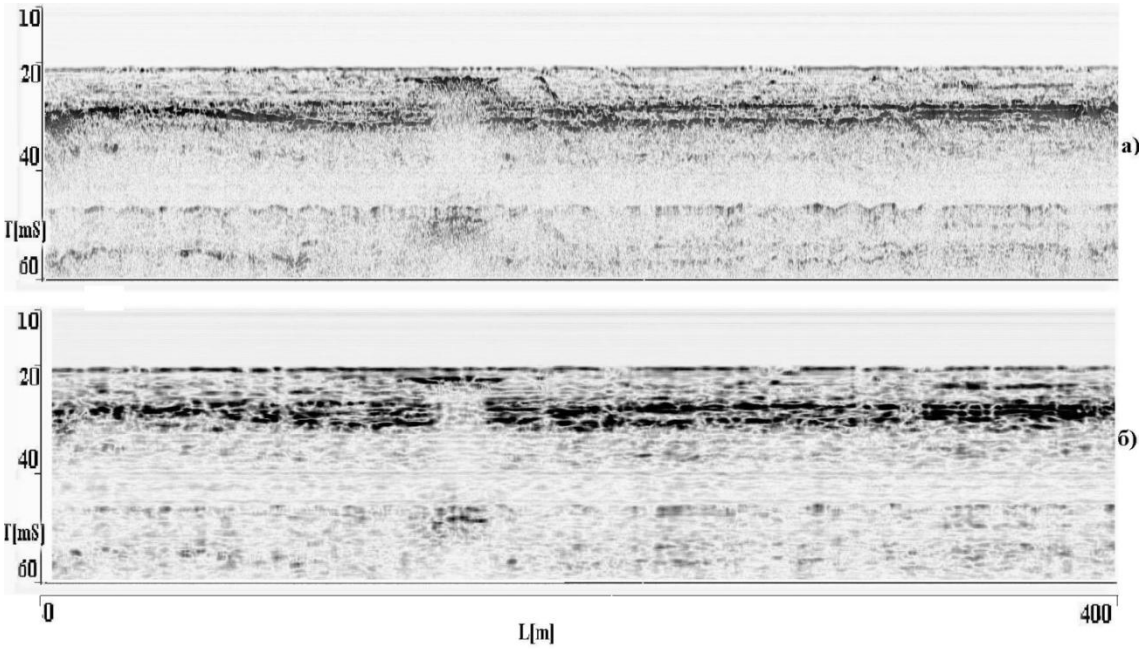


Рис. 4. Исходное изображение профиля дна,(а), размер апертуры антенны -0.4 м и обработанное изображение, размер апертуры синтезирования -3.0 м

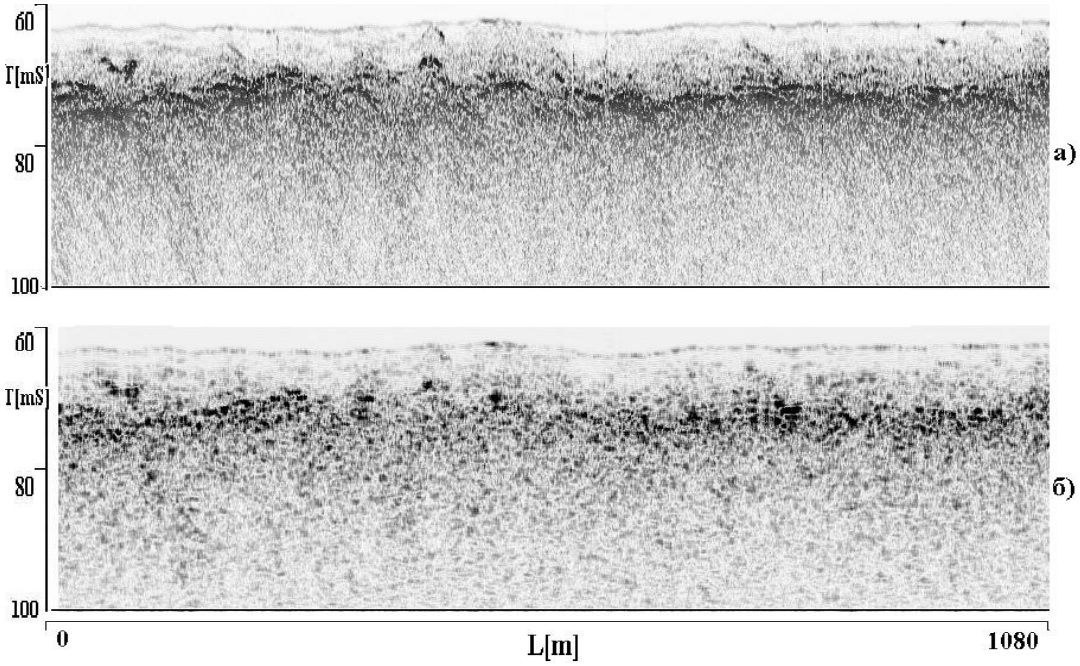


Рис. 5. Исходное изображение профиля дна (а), размер апертуры антенны -0.4м и обработанное изображение, размер апертуры синтезирования -7.4 м

На рис. 4-5 приведены примеры исходных изображений (а) и (б), обработанных с применением алгоритма синтезирования. На рис. 5 дно имеет слоистую структуру, отчетливо выделяется несколько плотных слоев и множество слабовыраженных слоев. На рис. 3 верхняя часть донных осадков представлена неконсолидированной массой донных осадков типа “жидкого” грунта, под ними располагаются неоднородная масса, состоящая из ила, перемешанного с плотными материалами. На всех изображениях можно заметить некие локальные вкрапления плотных пород, проявляющие себя в виде гиперболических осей с экстремумами на временах, соответствующих верхней образующей объекта.

В результате обработки характерные гиперболические сигнатуры в месте расположения локальных объектов в толще дна превращаются в точки после когерентной обработки, улучшается разрешение, что позволяет реально оценить размеры локальных объектов.

Аналогичные результаты были получены после обработки данных с помощью буксируемоего акустического ЛЧМ профилографа высокого разрешения разработанного в ИПМТ ДВО РАН. На рис. 7 приведена профилограмма дна в поперечном разрезе Амурского залива на траверзе мыса Россета. На ней хорошо виден слоистый чехол осадочных пород, мощность которого увеличивается с (10–12)м. на акватории, прилегающей к городу, до (30–35)м на противоположной части залива. На рис. 8 приведено обработанное изображение с применением алгоритма синтезирования. После обработки становятся более контрастными донные структуры с хорошим отражением, а также можно заметить, что увеличивается глубина прозвучивания, как следствие сужения диаграммы направленности синтезированной антенны.

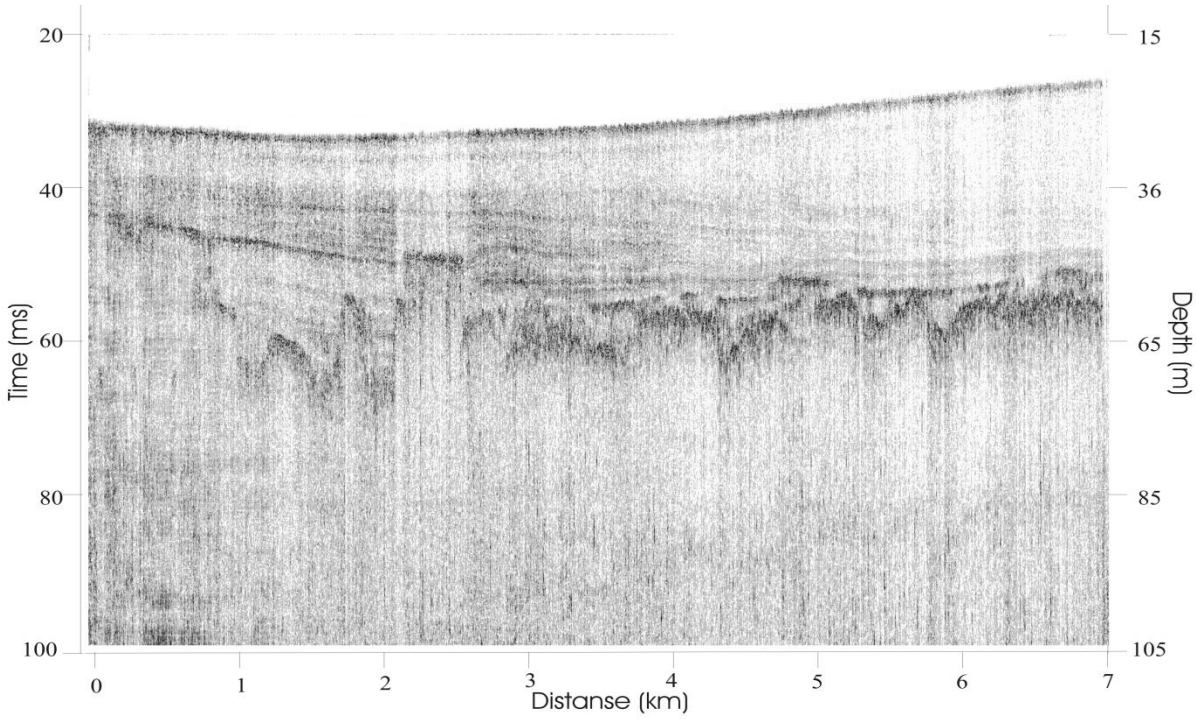


Рис. 7. Профилограмма дна в поперечном разрезе Амурского залива на траверзе мыса Россета. Дно с чехлом наносных осадочных пород и крупноблочным основанием. Исходное изображение

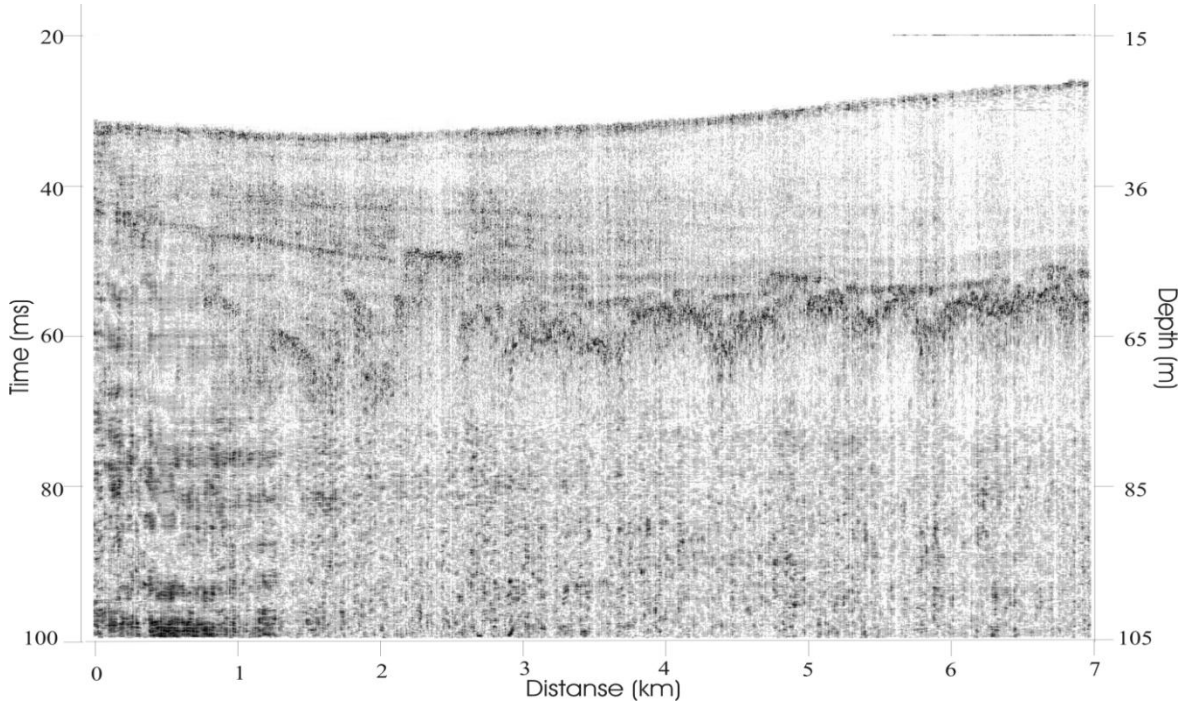


Рис. 8. Профилограмма дна в поперечном разрезе Амурского залива на траверзе мыса Россета. Обработанное изображение, размер апертуры синтезирования -15 м

Данные примеры иллюстрируют эффективность применения методов синтезирования апертуры в системе с данными параметрами сигнала и условиями проведения измерений для целей выделения малоразмерных структур и объектов.

Литература

1. Косарев Г.В., Ларионов Ю.Г. Использование акустического профилографа на борту АНПА для исследования структуры глубоководного участка дна в Северном Ледовитом океане. Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Санкт-Петербург. Наука, 2008, с. 152-154.

2. Косарев Г.В. Результаты профилирования морского дна в шельфовой зоне морей.. Труды 3 всероссийской научн. техн. Конф. Технические проблемы освоения мирового океана, Владивосток, 2009г., с.201-203.

3. Свининников. А.И.. Петрофизика западной части Тихого океана и окраинных морей востока Азии. –Владивосток, Дальнаука, 2004.

4. Bonifant W.W.Jr. Interferometic Synthetic Aperture Sonar Processing: a thesis presented to the Academic Faculty In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Electrical Engineering. Georgia Inst. of Tech. 1999.

5. Костоусов А.В., Костоусов В.Б. Моделирование гидролокатора бокового обзора с синтезированной апертурой // Материалы IV Международного симпозиума «Обобщенные решения в задачах управления». Изд-во Бурятского госуниверситета, 2008. С.74-76.

6. Касаткин Б.А., Косарев Г.В.. Цифровая обработка сигналов акустическим профилографом методами синтезирования апертуры Труды 3 всероссийской научн. техн. конф. Технические проблемы освоения мирового океана, Вл-к, 2009 г., с. 317-319.

7. .Захаров А.И., Каевицер В.И., Разманов В.М., Раскатов В.Н. Применение методов синтезирования апертуры в низкочастотных эхолотах-профилографах // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». Санкт-Петербург. Наука, 2008. С.143-147.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В МЕЛКОВОДНОМ РАЙОНЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

Д.Д. Минаев, В.В. Негода, Р.В. Леоненков, А.С. Корытко

Инженерная школа ДВФУ.
690091, г. Владивосток, ул. Пушкинская, д.10., тел /факс: (423) 221592,
e-mail: minaev_dd@inbox.ru

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: negoda@inbox.ru

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации
морских исследований ДВО РАН.
693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, д.25, тел /факс: (4242) 236966,
e-mail: roma1313@mail.ru

В докладе рассматриваются методика и результаты экспериментальных исследований характеристик гидроакустического канала передачи информации организованного с применением цифровых гидроакустических модемов типа S2CR 18/34 фирмы EvoLogics (Германия) выполненных в мелководном районе при наличии ледового покрова.

Создание автономных технических средств геоэкологического мониторинга прибрежных морских акваторий, испытывающих на себе значительное антропогенное воздействие, для доставки информации о состоянии среды конечному потребителю предполагает использование совокупности различных каналов передачи информационных сообщений [1]. В качестве одного из основных каналов передачи информации в подводном пространстве можно рассматривать гидроакустический канал. Однако эффективное применение гидроакустических средств передачи информации в значительной степени определяется характеристиками среды [2-5]. К особенностями прибрежных морских акваторий можно отнести незначительные глубины, наличие ледового покрова в течение длительного (до 5 месяцев в году) периода, изменчивость вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) [3], изменчивость акустических шумов [5] и др. В этой связи оценка характеристик гидроакустического канала передачи информации в сложных условиях не возможна без анализа данных полученных в ходе натурных экспериментальных исследований. Особый практический интерес представляют результаты исследований, полученные при наличии ледового покрова.

Исследования проводились на оз. Тунайча (о. Сахалин) в феврале 2013 года. В ходе проведения исследований оценивались возможности и характеристики канала передачи информации организованного с применением цифровых гидроакустических модемов типа S2CR 18/34 фирмы EvoLogics (Германия) [6]. Работы проводились на специально оборудованном полигоне, в пределах которого осуществлялись прямые измерения вертикального профиля скорости звука и глубины, а так же оценивались характеристики акустических помех и сигналов встроенными в гидроакустические модемы программно-аппаратными средствами. Методика исследований предполагала оценку характеристик цифрового гидроакустического канала передачи информации в прямом и обратном направлениях при передаче пакетных сообщений различного объема и формата данных, передаче сообщений формата NMEA 0183 в реальном времени, а так же передаче изображений и организации видеоконференции с передачей видеоряда через водную среду.

Программа исследований включала проведение натурного и вычислительного экспериментов. Вычислительные эксперименты проводились с использованием данных о характеристиках канала распространения, полученных методами прямых измерений в ходе натурного эксперимента.

Основными характеристиками цифрового гидроакустического канала передачи информации подлежащими оценке являлись время и скорость передачи тестовых пакетных информационных сообщений на различных дистанциях, достоверность передачи тестового сообщения (контрольная сумма принятого файла данных), точность оценки расстояния и временных задержек между корреспондентами, оценка параметров многолучевости. Указанные параметры определялись в прямом и обратном направлениях. Кроме того, в ходе проведения эксперимента осуществлена передача сообщений формата NMEA 0183 в реальном масштабе времени, а так же передача изображений и организована видеоконференция с передачей видеоряда через водную среду.

Методика проведения эксперимента предполагала оборудование стационарного и мобильного пунктов информационного обмена. Схема проведения исследований на акватории озера Тунайча представлена на рис.1, а схема размещения оборудования стационарного и мобильного пунктов информационного обмена представлена на рис.2.

Координаты точек размещения гидроакустических модемов на акватории оз. Тунайча в ходе проведения исследований

Точка (станция)	Координаты		Расстояние, м		
	Широта	Долгота			
«0»	46^0 49.3623 N	143^0 09.6112 E	250.92	403.50	502.94
«250»	46^0 49.4075 N	143^0 09.4252 E			
«400»	46^0 49.4350 N	143^0 09.3121 E			
«500»	46^0 49.4539 N	143^0 09.2389 E			

Рис.1. Схема проведения исследований характеристик гидроакустических модемов S2CR 18/34 фирмы EvoLogics GmbH на акватории озера Тунайча.

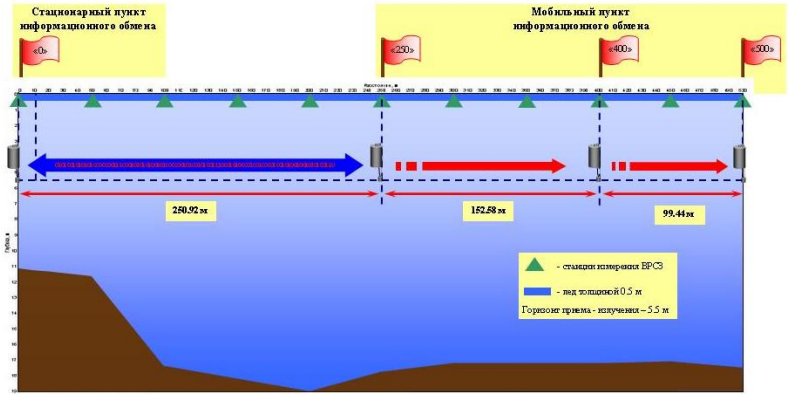


Рис.2. Схема размещения оборудования стационарного и мобильного пунктов информационного обмена в ходе проведения исследований на акватории озера Тунайча.

Проектирование опорных точек полигона и станций измерения ВРСЗ производилось при помощи электронной картографической навигационно-информационной системы Д´Карт. Вынос в натуру координат запроектированных опорных точек полигона и станций измерения ВРСЗ осуществлялся спутниковым навигационным GPS приемником типа Magellan ColorTRAK. Для увеличения точности определения расстояния между пунктами информационного обмена в ходе проведения работ производилась осреднение координат определяемых GPS приемником не менее чем по 100 измерениям. В расчет принимались значения обсерваций не менее чем по 5 спутникам и значениями фактора HDOP (горизонтальная точность определения плановых координат) не выше 2.0.

Антенны цифровых гидроакустических модемов были расположены на горизонте 5.5 м, глубина расположения антенн оставалась неизменной в ходе проведения эксперимента. Для постановки гермоконтейнеров с оборудованием модемов во льду были сделаны майны размером 1.0Х1.0 метра. В ходе оборудования майн определялась структура и толщина ледового и снежного покрова. Толщина однородного слоя льда составила не менее 0.5 м, далее располагался слой рыхлого водонасыщенного льда толщиной до 0.25 м, а над ним не менее 0.5 м снега. Для удобства размещения персонала и оборудования в ходе проведения исследований на льду над оборудованными майнами были установлены палатки. По мере выполнения программы работ палатка мобильного пункта информационного обмена с находящимся в нем оборудованием перемещалась по трассе полигона (см. рис.1 и рис. 2).

Измерения профиля скорости звука от поверхности до дна производились измерительным зондом RESON SVP-15 (диапазон измерения скорости звука 1375...1900 м/с, точность измерения скорости звука ±0.02 м/с), с регистрацией результатов измерений на ПЭВМ. Процесс измерения представлял собой получение 6-ти последовательных реализаций профиля ВРСЗ, с последующим усреднением измеренных значений. Значения скорости звука интерполировались с шагом 0,5 м по глубине. Измерения производились со льда через заранее оборудованные лунки, расположенные через каждые 50 метров по трассе исследуемого полигона (см. рис. 2). По данным датчика давления измерительного зонда дополнительно осуществлялось измерение глубин на каждой из станций. Результаты измерений были использованы в качестве исходных данных вычислительных экспериментов в целях оценки характеристик канала распространения на исследуемой трассе с применением методов лучевой акустики.

Для оценки характеристик цифрового гидроакустического канала передачи информации использовались два вида тестовых сообщений. В качестве основного тестового сообщения был использован сформированный текстовый файл содержащий символ «0» объемом 1024 байта. В качестве дополнительного тестового сообщения был использован сформированный файл с расширением *.PNG содержащий изображение телевизионной испытательной таблицы с разрешением 769Х577 объемом 50659 байт. В ходе проведения исследований осуществлялся взаимный информационный обмен сформированными тестовыми сообщениями между стационарным и мобильными пунктами. Программа исследований предполагала тестирование канала передачи в каждой точке положения мобильного пункта посредством взаимного обмена тестовыми информационными сообщениями. При этом передача текстового файла осуществлялась не менее 20 раз, а файла содержащего изображение не менее 10 раз. В качестве основных параметров документировалось: - время передачи информационного сообщения в секундах; - объем переданного и принятого сообщения в байтах; - эффективная скорость передачи информации (Net bitrate) бит/с; - номинальная скорость передачи информации (Raw bitrate) бит/с. Документирование параметров осуществлялось при помощи специализированного программного обеспечения входящего в состав программно-аппаратных средств гидроакустических модемов S2CR 18/34. Качество (целостность) принятого тестового сообщения оценивалось по совпадению с контрольной суммой образа. Параллельно с оценкой основных параметров канала передачи оценивались: - время распространения сигнала от точки

излучения до точки приема; - показатели многолучевости канала распространения (количество основных энергонесущих групп лучей, время задержки каждой группы лучей). Оценка данных показателей осуществлялась с помощью системы внутреннего контроля входящей в состав программно-аппаратных средств гидроакустических модемов S2CR 18/34 в командном режиме после передачи тестовых сообщений.

Оценка возможности передачи сообщений формата NMEA 0183 в режиме реального времени выполнялась с применением спутникового навигационного GPS приемника типа Magellan ColorTRAK. Сообщения формата NMEA 0183 (GGA, RMC, GSA, GSV, GLL) с цифрового выхода GPS приемника поступали на входной RS-232 порт гидроакустического модема. Параллельно с этим NMEA сообщения в виде текстового файла документировались на ПЭВМ для оценки качества канала передачи. Скорость межприборного обмена составляла 19200 бит/с. Качественный анализ предполагал оценку целостности структуры каждого из передаваемых типов NMEA сообщений и отсутствие пропусков данных.

В ходе проведения исследований также была организована видеоконференция с передачей видеоряда через водную среду. Для этого приборные части гидроакустических модемов были подключены к ПЭВМ через интерфейс RS 232, а к USB порту одной из ПЭВМ дополнительно была подключена стандартная Web камера. На обеих ПЭВМ было актуализировано программное обеспечение, входящее в состав гидроакустических модемов EvoLogic 18/34 – «S2C modem demonstration software» Version 1.2. Функциональный состав программного обеспечения имеет опцию «Webcam» и позволяет в качестве источника данных использовать изображение, формируемое внешней Web камерой. Оптимизация соотношения качество/размер передаваемого по гидроакустическому каналу кадра видеоконференции осуществлялось регулятором качества изображения Web камеры в ручном режиме. Количественная оценка предполагала определение времени передачи кадра видеоизображения заданного разрешения, а качественный анализ визуальную оценку качества передаваемого кадра видеоизображения.

Вычислительные эксперименты были выполнены для ненаправленного приема-излучения, диапазона выхода лучей $\pm 15^0$ и частоты акустического сигнала 34 кГц. По результатам измерений глубины места и ВРСЗ на трассе исследуемого полигона была сформирована модель волновода с переменными параметрами для проведения расчетов по программе [7,8]. Для оценки точности определения дистанции между пунктами информационного обмена для модели волновода с переменными параметрами методами лучевой акустики были произведены расчеты характеристик лучевых компонент и в частности определены параметры групп водных и переотраженных от границ волновода лучей. В качестве характеристик лучевых компонент оценивался диапазон расчетных и экспериментальных значений временных задержек, диапазоны углов выхода и длина пути различных видов лучей. Указанные расчеты выполнялись в прямом и обратном направлении для расстояния между корреспондентами информационного обмена равному 502.94 м.

Заключение

Результаты натурных и вычислительных экспериментов по исследованию характеристик гидроакустического канала передачи информации организованного с применением цифровых гидроакустических модемов типа S2CR 18/34 фирмы EvoLogics (Германия) в условиях мелководья при наличии ледового покрова позволили сформулировать следующие выводы:

1. Сформированная по данным прямых измерений модель волновода с переменным по трассе рельефом и профилем ВРСЗ с достаточной степенью адекватности описывает гидроакустические условия в районе проведения исследований. Данные прямых измерений подтверждаются результатами ранее выполненных независимых исследований и расчетами, выполненными по общепринятым методикам. Результаты измерения поля скорости звука

позволили выявить проявления эффекта вертикальной конвекции (апвеллинга) водных масс на исследуемой акватории.

2. Данные эксперимента и результаты моделирования подтверждают наличие в канале распространения эффекта многолучевости. Средние значения временных задержек и расстояний между корреспондентами информационного обмена полученные в ходе натурного эксперимента превышают расчетные значения аналогичных показателей для групп водных лучей. Сопоставимые с экспериментальными данными расчетные значения соответствуют группам лучей претерпевших донно-поверхностные отражения. Различия в измеренных и расчетных оценках расстояния могут быть обусловлены как несовершенством алгоритма подавления многолучевости реализованного в гидроакустических модемах, так и точностью определения эталонного значения расстояния и требуют дополнительной экспериментальной проверки.

3. Гидроакустические модемы типа S2CR 18/34 фирмы EvoLogics (Германия) обладают широкими потенциальными возможностями и позволяют организовать устойчивый канал передачи различных видов информационных сообщений с достаточной степенью достоверности в сложных гидролого-акустических условиях при наличии многолучевости и подледном распространении. Кроме того, гидроакустические модемы при их применении в контролируемых условиях могут быть использованы и как средство проведения исследований гидролого-акустических характеристик среды.

4. Достигнутые в натурных условиях количественные показатели пропускной способности гидроакустического канала передачи информации реализованного с применением цифровых гидроакустических модемов типа S2CR 18/34 фирмы EvoLogics (Германия) позволяют существенно расширить технические возможности разрабатываемых образцов автономных средств геоэкологического мониторинга прибрежных морских акваторий и являются достаточными для технической реализации создаваемых на их основе подводных пространственно распределенных информационно-измерительных сетей.

Литература

1. Минаев Д.Д. Принципы построения региональной автоматизированной информационной системы экологического мониторинга морских акваторий с применением автономных технических средств и робототехнических комплексов // Подводные исследования и робототехника. 2011. №2(12). С. 64-68.
2. Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2(8). С. 44-49.
3. Минаев Д. Д., Петухов В.И. Моделирование акустических характеристик мелководных морских акваторий по данным натурных экспериментальных исследований // Подводные исследования и робототехника. 2013. №1(15). С. 45-51.
4. Мальцев Ю.В., Минаев Д.Д. Экспериментальные исследования статистических характеристик параметров акустических сигналов в мелководных районах с применением волноводных антенн бегущей волны.//Сборник статей Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. Вып. 32.-Владивосток: ТОВМИ, 2001. - С.91-100.
5. Минаев Д. Д., Негода В. В., Пахомов С. А. Результаты экспериментальных исследований суточной динамики акустических шумов в условиях мелководья.//Сборник статей Проблемы и методы разработки и эксплуатации вооружения и военной техники ВМФ. Вып. 32.-Владивосток: ТОВМИ, 2001. - С.101-104.
6. S2C-AMA User Guide (version 1.2). EvoLogics GmbH, Germany. November 2010. 34 p.
7. Rodrguez O. General description of the BELLHOP ray tracing program. Signal Processing Laboratory (SiPLAB) at the Center of Technological Research (CINTAL), University of Algarve, Portugal. 2008. 37 p.
8. Rodrguez O. General description of the TRACE & TRACEO ray tracing programs. Signal Processing Laboratory (SiPLAB) at the Center of Technological Research (CINTAL), University of Algarve, Portugal. 2012. 69 p.

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ С КОРОТКОЙ И ДЛИННОЙ БАЗОЙ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

К.Г. Кебкал, А.Г. Кебкал

Evologics GmbH, Ackerstrasse 76, 13355 Berlin Germany, tel: +49 30 31472658,
e-mail: kebkal@evologics.de

Работа телеуправляемого подводного аппарата в глубокой воде или под дрейфующим льдом связанна с множеством ограничений и рисков. Поэтому использование в таких условиях автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) является предпочтительным или, в ряде случаев, единственно возможным. Часто применение АНПА предполагает наличие режима «автономности под надзором», а также возможность непосредственного управления функциями АНПА в режиме, близком к реально временному. Обеспечение этих режимов представляется возможным только за счет оснащения АНПА и средств сопровождения высокоточной системой позиционирования/навигации и высокопроизводительной системой цифровой гидроакустической связи. Статья представляет гибкое техническое решение для высокоточного позиционирования подводных абонентов цифрой гидроакустической связи, объединяющее функции ультракороткобазовой (УКБ) антенны, длиннобазовой (ДБ) антенны и высокоскоростного обмена цифровой информацией между объектом и системой позиционирования. Система позиционирования комбинирует жестко закрепленные под поверхностью воды трансиверы УКБ антенн (глубина порядка метров) и «свободные» трансиверы ДБ антенны, свисающие с поверхности в толщу воды на кабеле (на глубину ниже сезонного термоклина, т.е. порядка сотен метров). УКБ антенна, расположенная над «свободным» трансивером отслеживает его перемещения, что позволяет учесть (скомпенсировать) случайные изменения длин базовых линий ДБ антенны и, соответственно, значительно повысить точность ДБ позиционирования транспондеров в области покрытия ДБ антенны. Каждый трансивер содержит полный набор функций высокоскоростного гидроакустического модема, что обеспечивает возможность управления АНПА на основе текущих данных позиционирования. На практике, оценки координат каждого из «свободных» трансиверов ДБ антенны, занимающих глубины 100-150 м, выполняемые с помощью фиксированных над ними УКБ-трансиверов (под поверхностью на жестком стержне на глубине 3-5 м), имеют точность порядка 10 см. При такой точности оценки базы ДБ антенны и длине базовой линии порядка километров, ожидаемая точность позиционирования транспондеров имеет порядок 10 см. Статья представляет экспериментальные данные по всем ключевым элементами комбинированной системы.

Введение

Ключевое преимущество системы позиционирования с длинной базой состоит в высокой точности оценки координат объекта позиционирования. Стационарное размещение трансиверов ДБ антенны на дне обеспечивает высокоточную оценку трехмерных координат транспондеров, перемещающихся в толще воды. Однако, размещение ДБ антенны на дне, ее калибровка, эксплуатация и свертывание обусловлены значительными трудозатратами и дорогим материальным обеспечением [1]. Использование дрейфующих трансиверов ДБ антенны представляет собой намного менее затратную задачу, однако, обеспечиваемые точности позиционирования существенно ниже. Трансиверы на длинном кабеле могут отклоняться течениями и раскачиваться в случайном диапазоне углов, так что их взаимные положения случайным образом варьируют (рис.1). Например, при длине кабеля 150 м горизонтальные смещения трансиверов ДБ антенны под воздействием течений могут составлять десятки метров от точки входа кабеля в воду, а расстояния между трансиверами могут варьировать в диапазоне многих метров. В результате, ошибки в оценках координат

объектов позиционирования могут составлять многие десятки метров, что является неприемлемым для многих прикладных задач. Создание высокоточной системы ДБ позиционирования со «свободными» трансиверами, действующей под поверхностью водоема, представляет весьма значимый интерес.

Техническое решение

Решение, представленное в этой статье, появилось в ходе экспериментов по комбинированию фиксированных на жестком стержне под поверхностью льда трансиверов УКБ антенн и свешиваемых на длинном кабеле с поверхности льда трансиверов ДБ антенны (рис. 1). Каждый из трансиверов являлся полнофункциональным гидроакустическим модемом с надстройками в виде протоколов верхнего уровня, обеспечивающими функции позиционирования. Гидроакустические модемы обеспечивали высокопроизводительный обмен данными между всеми получателями/отправителями данных, включая транспондер на подводном аппарате (объекте позиционирования).

Фиксированный под поверхностью воды трансивер УКБ антенны оценивал положение соответствующего «свободного» трансивера ДБ антенны, что позволяло учесть текущие значения базовых линий ДБ антенны и таким образом добиться высокой точности определения координат транспондера на объекте позиционирования.

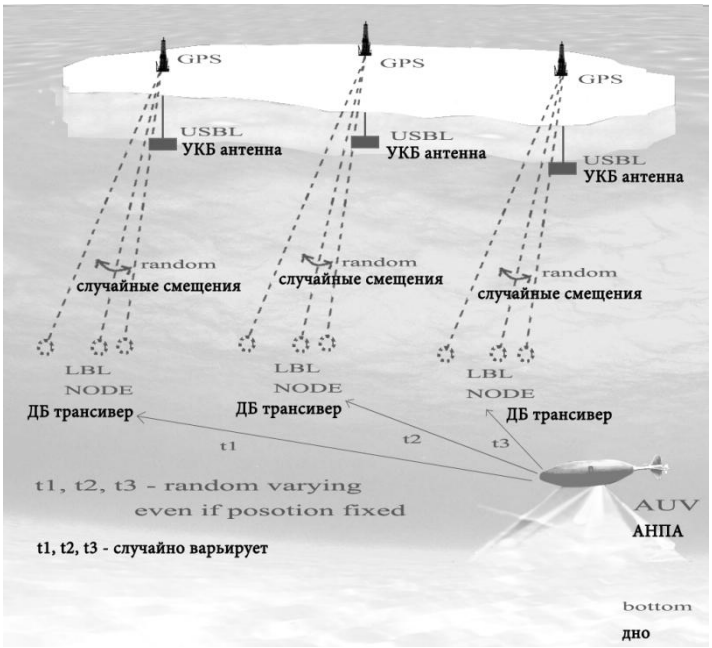


Рис. 1. Иллюстрация комбинированной системы УКБ и ДБ позиционирования

Исполнение системы

Комбинированная система УКБ и ДБ позиционирования основывалась на использовании устройств цифровой гидроакустической связи технологии S2C [2], [3] производства компании EvoLogics, Германия. Некоторые из особенностей этих устройств, использованные для создания системы, состоят в следующем:

– в способности одновременно обмениваться данными и выполнять высокоточную оценку координат удаленного источника/получателя данных;

– в наличии развитого протокола MAC-уровня, способного учитывать текущие особенности гидроакустической среды и обеспечивающего широкий набор методов доступа к каналу;

– в поддержке расширенного набора функций для реализации протоколов сетевого уровня;

– во взаимной совместимости гидроакустических модемов и широкого набора трансиверов, способных функционировать независимо или в составе комбинированной системы УКБ и ДБ позиционирования.

УКБ трансиверы представляют собой интегрированные устройства, объединяющие функции гидроакустического модема и УКБ позиционирования. Весь набор функций реализован на одном процессорном модуле и в одном электроакустическом тракте. Одни и те же сигналы используются как для передачи данных, так и для оценки координат их источника (каждый пакет данных содержит идентификатор передающего устройства). Все передаваемые данные содержат служебную информацию для поддержания соединения открытым даже в отсутствие предназначенных для передачи полезных данных.

В таком исполнении навигация подводного аппарата в масштабе времени, близком к реальному, обеспечивается, в частности, благодаря отсутствию времязатратных переключений между режимами позиционирования и передачи данных. Эта особенность позволила нивелировать один из существенных недостатков современных гибридных систем гидроакустического позиционирования и связи – недостаток, связанный с раздельным исполнением режимов функционирования устройства.

В дополнение к этому возможности реально-временного управления АНПА обеспечивались также за счет использования специальных свойств устройств технологии S2C, обеспечивающих обмен «срочными сообщениями». Срочные сообщения использовались для передачи управляющих последовательностей без прерывания и без ожидания завершения текущего потока данных. Срочные сообщения передаются поверх текущего потока как часть служебной информации, которая всегда сопровождает передаваемый кластер (последовательность пакетов) данных. Благодаря такому механизму доставки срочных сообщений гарантируется доступ управляющих данных к каналу связи за короткое детерминированное время. Благодаря этому и на основе известной оператору текущей позиции аппарата доставка на АНПА управляющих команд с использованием срочных сообщений может представлять собой средство для управления им в реальном (или близком к реальному) времени.

В следующих разделах по отдельности продемонстрированы функциональные возможности и экспериментальная производительность каждой из основных составляющих комбинированной системы УКБ и ДБ позиционирования. Для анализа производительности каждой из составляющих ниже представлены результаты экспериментов по

– оценке точности УКБ позиционирования медленно движущихся транспондеров в бассейне, характеризуемом высоким уровнем реверберации;

– оценке точности воспроизведения результата УКБ позиционирования медленно движущихся транспондеров в открытой воде вблизи дна при расположении системы и объекта позиционирования в одном горизонте глубин;

– оценке точности воспроизведения результата УКБ позиционирования медленно движущихся транспондеров в открытой воде при вертикальном расположении системы и объекта позиционирования;

– оценке точности ДБ позиционирования медленно движущихся транспондеров в открытой воде при одновременном обмене цифровой информацией между системой и объектом позиционирования.

Оценка точности УКБ позиционирования медленно движущихся транспондеров в бассейне

При обсуждении результатов экспериментов ниже приводятся такие понятия, как «точность» и «точность воспроизведения результата» позиционирования. При обсуждении точности рассчитывается среднеквадратическое отклонение от заранее известных координат

транспондера. При обсуждении точности воспроизведения результата координаты транспондера не известны и результат позиционирования оцениваются по среднеквадратическому рассеиванию вокруг некоторого среднего.

Представленные в этой секции экспериментальные результаты позволяют установить точность такой составляющей комбинированной системы, как интегрированное устройство УКБ позиционирования и цифровой гидроакустической связи. Выполненные при этом измерения можно считать как калибровочные, и, при работе с этой системой в последующем результаты позиционирования можно считать несмещенными (когда точность воспроизведения результата позиционирования эквивалентна точности позиционирования).

В эксперименте по УКБ позиционированию медленно движущихся транспондеров в бассейне в качестве объекта позиционирования выступал транспондер на малогабаритном телеуправляемом аппарате (ТПА), который медленно перемещался в бассейне круглой формы диаметром 5.0 м и глубиной 4.5 м. Транспондер размещался в верхней части ТПА. УКБ-трансивер размещался в центральной части бассейна на жестком стержне на глубине 1 м. Маршрут ТПА лежал в диапазоне глубин 3.5-4.5 м.

На дне бассейна по известным координатам устанавливалась вертикальная ступенчатая конструкция, состоящая из нескольких металлический листов с множеством фигурных отверстий (Рис. 2). Известное расположение конструкции на дне и ее геометрия обеспечивали точное задание координат каждому из отверстий в толще воды.

ТПА двигался по задаваемому оператором маршруту. При подходе к каждому из отверстий ТПА фиксировался с помощью фигурного штифта, точно соответствующего его геометрической форме. Для полного прилегания к каждому из отверстий ТПА оснащался фронтальным буфером. Поскольку местные координаты размещения транспондера на ТПА заранее известны, после прилегания к каждому из отверстий трехмерные координаты расположения транспондера в толще воды были также известны. Такие условия эксперимента позволяли сравнивать координаты, выдаваемые устройством УКБ позиционирования, с координатами, которые ТПА проходил по маршруту следования от одного отверстия к другому.

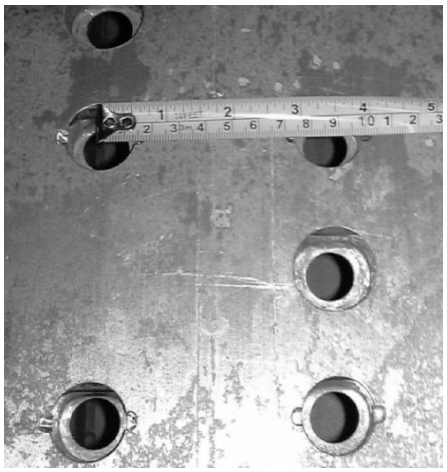


Рис. 2. Стенка донной конструкции с отверстиями с известными координатами

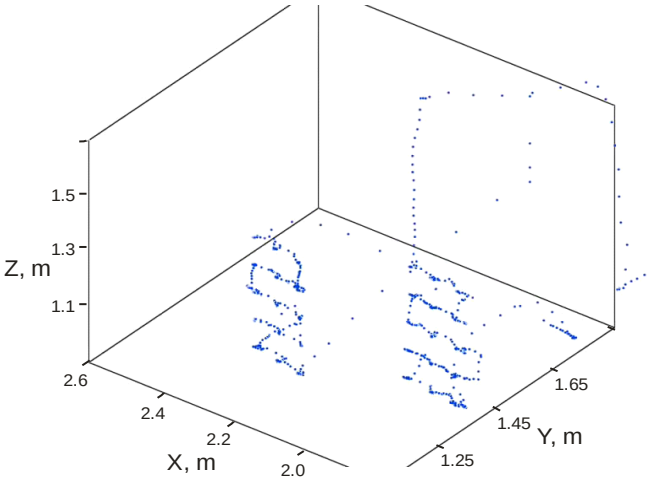


Рис. 3. Результаты УКБ позиционирования по маршруту следования ТПА от отверстия к отверстию

В качестве трансивера использовалось интегрированное устройство УКБ позиционирования и цифровой гидроакустической связи, промышленная модель S2CR 40/80 USBL [4]. В качестве транспондера использовался гидроакустический модем, промышленная модель S2CR 40/80 [5]. В данном эксперименте интегрированное устройство

УКБ позиционирования и цифровой гидроакустической связи выполняло только задачу позиционирования (без передачи полезных данных), в то время как гидроакустический модем выполнял только функцию транспондера (пользовательские данные не передавались). Устройства занимали полосу частот шириной 26 кГц при центральной частоте 51 кГц. Диаграмма направленности приемоизлучателя была конической с углом открытия 70 градусов. Диаграмма направленности гидрофонов УКБ антенны была круговой. Звукопоглощающие экраны на дне и стенках бассейна не использовались, но благодаря конической направленности приемоизлучателя (и вертикальном расположении оси вращения конуса) уровень отражений от стенок бассейна на входе гидроакустического тракта был невысоким (менее –10 дБ). Однако множественные донно-поверхностные отражения все же обуславливали большую протяженность и высокий уровень реверберации (порядка –2-5 дБ). Для пересчета задержек распространения в дальность система позиционирования учитывала среднюю скорость звука в воде (вода была перемешана, а разность глубин небольшой, так что необходимость учета вариации скорости звука отсутствовала). Рис. 3 демонстрирует результаты позиционирования ТПА при его движении от отверстия к отверстию. У каждого из отверстий выполнялось приблизительно 100 измерений позиции аппарата. В целом, представленная на рис. 3 последовательность состоит из 3000 измерений.

Стандартные отклонения в оценках позиции транспондера в плоскостях XY, XZ, YZ не превышали 1.5 мм, что соответствует угловому отклонению в пределах 0,04° от ожидаемого (по априорным данным) направления на источник сигнала. В процентном отношении точность оценки позиции транспондера составляла 0,07% наклонной дальности.

Следует отметить, что, несмотря на высокий уровень реверберации в бассейне, какие либо выбросы в оценке координат транспондера отсутствовали. Это объясняется с одной стороны тем, что использование технологии непрерывного расширения спектра обеспечивает существенное снижение эффектов многолучевого распространения сигнала. С другой стороны, тем, что текущая оценка координат считалась надежной только в случае, если вся служебная или пользовательская информации в составе пакета принята успешно (т.е. циклический контроль четности принятой порции информации ошибок не обнаруживал). В случае обнаружения ошибок контроля частности текущая оценка координат обозначалась как ненадежная (в зависимости от алгоритма, она может отбрасываться или частично учитываться, например, умножаться на небольшой вес).

Следует также отметить, что, несмотря на наличие реверберации, достигнутая точность является близкой к максимальной, в частности, из-за отсутствия или пренебрежимо малого объемного рассеивания сигнала, а также отсутствия неточностей в учете профиля скорости звука по глубине. Полученное значение является важной лабораторной величиной, которая может использоваться как опорная при разработке алгоритмов обработки сигнала, позволяющих учитывать и компенсировать влияние различных эффектов гидроакустической среды в задачах практического интереса.

Оценка точности воспроизведения результата УКБ позиционирования в открытой воде вблизи дна при расположении системы и объекта позиционирования в одном горизонте

В этом разделе представлены результаты работы системы УКБ позиционирования в открытой воде (Атлантический океан, к северу от Мадейры), позволяющие оценить разброс оценок позиционирования транспондера при его дрейфе в толще воды у дна на умеренном удалении от трансивера. Так же как в предыдущем эксперименте, малоразмерный ТПА служил носителем транспондера. ТПА перемещался в интервале глубин между 5000 и 5200 м на удалении до 250 м от опускаемого на кабеле модуля сопровождения (габаритного модуля

сопровождения, так называемого TMS, к которому был подключен ТПА, опускаемого на кабель-тросе на рабочие на глубины с борта исследовательского судна “FS Maria Merian”).

В верхней части рамы TMS размещался трансивер – интегрированное устройство УКБ позиционирования и цифровой гидроакустической связи – модель S2CR 48/78 USBL [6]. Функцию транспондера выполнял гидроакустический модем, модель S2CR 48/78 [7].

В этом эксперименте, кроме позиционирования, трансивер и транспондер выполняли так же обмен полезными данными. Данные передавались в режиме срочных сообщений на фиксированной скорости связи 1 кбит/с. В ходе обмена данными, трансивер использовал каждый принимаемый пакет для оценки позиции удаленного абонента связи (отправителя).

Устройства занимали полосу частот шириной 30 кГц между 48 и 78 кГц. Диаграмма направленности приемоизлучателя была тороидальной с углом открытия в вертикальной плоскости около 80 градусов. Диаграмма направленности гидрофонов УКБ антенны была круговой. Для пересчета задержек распространения в дальность система позиционирования учитывала также только среднюю скорость звука на данном горизонте глубин (на глубинах порядка 5000 м градиент скорости звука слабовыражен, а разность по глубине между TMS и ТПА небольшая, так что необходимость учета вариации скорости звука отсутствовала).

Оценка позиции транспондера выполнялась приблизительно 1 раз в секунду. Результаты позиционирования представлены на рис. 4 (глубина ТПА указана по отношению к глубине TMS). Как следует из рисунка, в ходе позиционирования наблюдалось умеренное рассеивание оценок позиции и отсутствие выбросов. В частности, на дистанциях около 100 м стандартное отклонение оценки позиции не превышало 8 см, а на дистанции 200 м стандартное отклонение составляло около 17 см. В соответствии с этим точность воспроизведения результата позиционирования (по стандартному отклонению) составиляла 0,085% наклонной дальности. Следует отметить, этот результат хорошо согласуется с результатом, порученным при выполнении экспериментов в бассейне, что объяснятся (и обуславливается) незначительной вариацией скорости звука в данном диапазоне глубин, а также небольшой дальностью распространения (незначительным объемным рассеванием).

Оценка точности воспроизведения результата УКБ транспондеров в открытой воде при вертикальном расположении системы и объекта позиционирования

В этом разделе представлены экспериментальные результаты работы системы позиционирования в открытой воде (Атлантический океан, к северу от Мадейры), позволяющие оценить разброс оценок позиции транспондера при его спуске-подъеме и значительной дальности до трансивера. Модуль TMS опускался с борта немецкого исследовательского судна “FS Maria Merian”. В состав TMS включался гидроакустический модем, модель S2CR 7/17 [8], выполнявший функцию транспондера. Для отслеживания позиции транспондера под водой судно оснащалось трансивером – интегрированным устройством УКБ позиционирования и цифровой гидроакустической связи – модель S2CR 7/17 USBL [9]. Трансивер закреплялся на массивной раме в технологическом отверстии на глубине около 7 м (1 м под килем судна). Устройства занимали полосу частот шириной 10 кГц между 7 и 17 кГц. Диаграммы направленности приемоизлучателей трансивера и транспондера были полусферическими. Диаграмма направленности гидрофонов УКБ антенны была круговой. В отличие от предыдущих экспериментов фактором, осложняющим условия функционирования трансивера, являлся шум энергетической установки судна, приводов системы динамического позиционирования и движителей судна. Для обеспечения работы трансивера в этих условиях, уровень излучаемых транспондером сигналов повышался до уровней 184-185 дБ.

В этом эксперименте данные о вертикальном разрезе скорости звука отсутствовали, поэтому для пересчета задержек распространения в дальность система позиционирования

учитывала среднюю для сезона скорость звука на всем диапазоне глубин. Поскольку интересовала не столько точность позиционирования, сколько точность воспроизведения оценки координат транспондера от измерения к измерению, результаты эксперимента имели достаточно высокую ценность: несмотря на то, что оценки координат являлись смещенными, порядок рассеивания этих оценок давал представление о степени ухудшения результата позиционирования, в частности, за счет влияния объемного рассеивания (предполагалось, что при дистанциях порядка километров влияние объемного рассеивания должно быть значимым). Кроме того, данные позиционирования, пусть даже смещенные, давали представление команде исследовательского судна о вращении опускаемого модуля, соответственно, и рисках повреждения (перекручивания) кабель-троса.

Так же как в предыдущем эксперименте, кроме позиционирования выполнялась также задача приема-передачи данных в режиме срочных сообщений с фиксированной скоростью связи 1 кбит/с. При спуске-подъеме TMS оценка обмен данными, и соответственно, оценка его позиции осуществлялась каждые 4 с. Результат позиционирования представлен на рис. 5. Как следует из рисунка, выбросы отсутствуют, а разброс в оценках позиции транспондера является умеренным. В частности, на дистанциях около 1000 м стандартное отклонение оценки позиции не превышало 1.11 м, а на дистанции 2000 м стандартное отклонение составляло 2.34 м. В соответствии с этим точность воспроизведения результата позиционирования (по стандартному отклонению) составляла 0,117% наклонной дальности. Как и ожидалось, наблюдается некоторое ухудшение точности позиционирования, предположительно под влиянием объемного рассеивания, которое становится значимым фактором при достижении больших дальностей распространения сигнала.

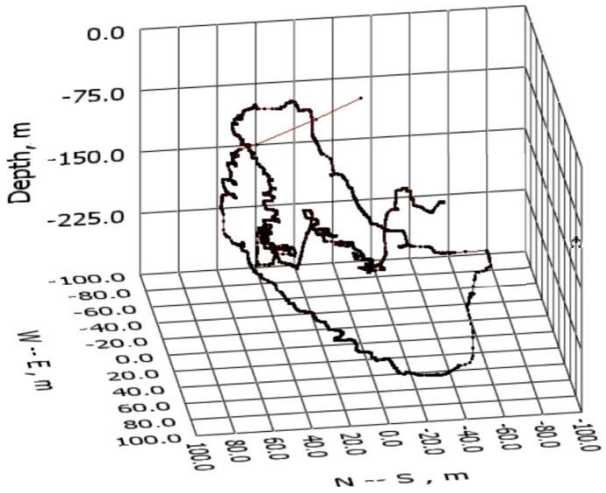


Рис.4. Оценка координат ТПА движущегося на умеренном расстоянии от УКБ транси-вера (W--E: запад-восток, N--S север-юг)

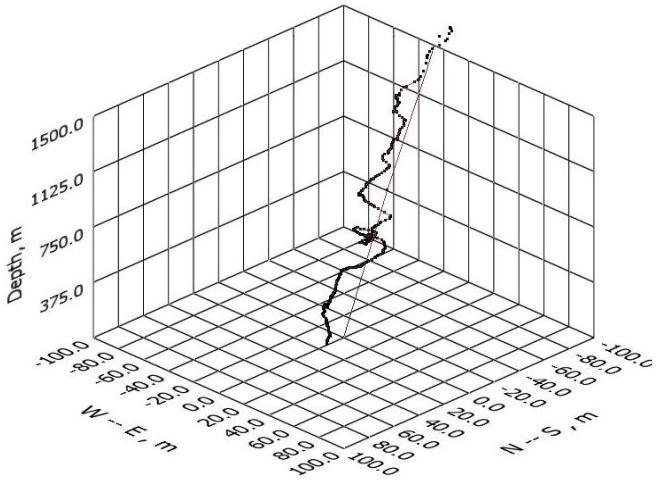


Рис. 5. Оценка координат ТПА движущегося на большом расстоянии от УКБ трансивера (W--E: запад-восток, N--S север-юг)

Оценка точности ДБ позиционирования при одновременном обмене цифровой информацией между ДБ трансиверами и транспондером

Для оценки точности воспроизведения результата ДБ позиционирования при одновременном обмене цифровой информацией между системой и объектом позиционирования (модель S2CR 18/34 LBL [10]) были выполнены три долгосрочных эксперимента в озере Байкал в 2010-2012 годах. В первом эксперименте два трансивера ДБ антенны разворачивались с поверхности льда и располагались на кабеле на глубине 10 м.

В качестве трансивера использовалось интегрированное устройство цифровой гидроакустической связи и ДБ позиционирования, промышленная модель S2CR 18/34 LBL Node [10]. Базовая линия имела длину 170 м.

Задача состояла в определении координат транспондера при удалении его от базовой линии на 180 м. Транспондер, промышленная модель S2CR 18/34 LBL Beacon [10] (рис.6), закреплялся на тросе лебедки, обеспечивающей его перемещение до глубины 1000м. Система занимала полосу частот шириной 16 кГц между 18 и 34 кГц. Диаграммы направленности приемоизлучателей трансивера и транспондера были слабо направлены в вертикальной плоскости и были ненаправленными в горизонтальной плоскости. При осуществлении позиционирования трансиверы и транспондеры обменивались пакетами данных, передаваемых на фиксированной скорости 1 кбит/с. Благодаря оснащению лебедки точным счетчиком длины выданного троса глубина точки закрепления на тросе транспондера была известна с сантиметровой точностью. В условиях неподвижной воды (течением в зимнее время можно пренебречь) расстояния между точками закрепления устройств на тросе/кабелях и точками входа троса/кабелей в воду совпадали. Это позволяло использовать лазерный дальномер для измерения длины базовой линии ДБ антенны и дальностей от трансиверов антенны до транспондера. Точность измерения дальностей лазерным дальномером составляла полсантиметра. Такие условия эксперимента позволяли выполнить сравнение координат транспондера, оцениваемых системой ДБ позиционирования, с координатами транспондера, задаваемыми его механической предустановкой в толще воды. В свою очередь такое сравнение позволяло сделать заключение не только о точности воспроизведения результата, но и о точности системы ДБ позиционирования как средства измерения координат.

Для исключения влияния неточностей при измерении и учете вертикального разреза скорости звука в первой части эксперимента транспондер и трансиверы устанавливались на одну глубину (10 м). С учетом измеренной на этой глубине скорости звука, система позиционирования пересчитывала задержки распространения сигнала в дальности.

В ходе экспериментов было установлено, что «акустическая» оценка позиции транспондера всегда находилась в пятимиллиметровой окрестности позиции, задаваемой путем его механической предустановки. Следует отметить, что такая точность ДБ позиционирования должна была позволить наблюдать за вращением транспондера, установленного эксцентрично по отношению к продольной оси троса (рис. 6). Это предположение было проверено экспериментально: при разворачивании троса вокруг своей оси (с помощью прикрепленного к нему рычага), транспондер испытывал медленное вращение вокруг троса, что обнаруживалось системой ДБ позиционирования и продемонстрировано на рис. 7 (плоскость XY – проекция на плоскость горизонта). По данным рис. 7 радиус вращения составлял 12 см, что в точности соответствовало сумме радиусов транспондера и троса. Рассеивание координат вокруг окружности радиусом 12 см со стандартным отклонением 5 мм проиллюстрировало точность системы ДБ позиционирования в данных условиях среды (открытая вода, длина базы и удаления сравнимы и имеют порядок сотен метров).

Рис. 6. Транспондер, прикрепленный к тросу

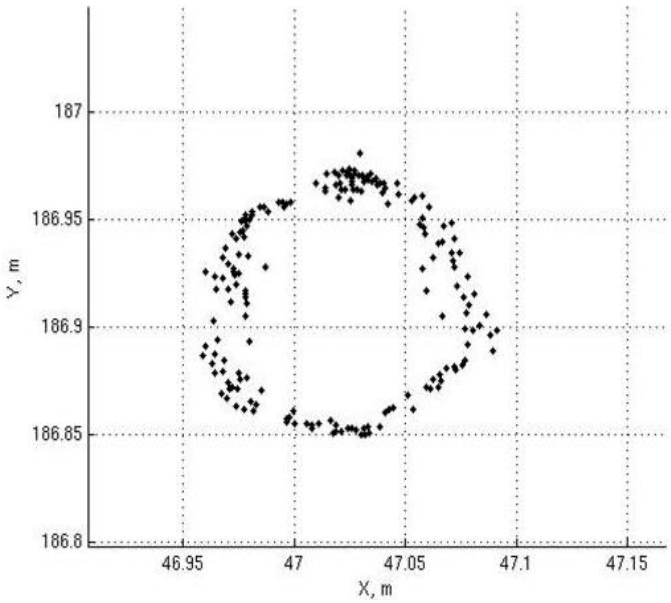


Рис. 7. Результат позиционирования транспондера при его вращении вокруг троса

В других экспериментах, более сложных по постановке, система позиционирования учитывала вертикальный разрез скорости звука для оценки трехмерных координат транспондера. В частности, при спуске транспондера на глубины до 1000 использовался метод расчета и учета нелинейности траекторий распространения сигнала, основанный на решении системы уравнений с граничными условиями, задаваемыми на основе упрощающих предположений о характеристиках среды распространения сигнала (опубликовано авторами в [11]). Практическое использование этого метода позволило добиться высокой точности позиционирования при невысокой сложности вычислений. В частности, при длине базовой линии от 40 до 140 м, экспериментальная точность позиционирования транспондеров, находящихся в состоянии медленных перемещений на расстояниях до 420 метров от донной антенны, имела порядок сантиметров (по среднеквадратическому отклонению).

В долговременном эксперименте 2012 года ДБ антенна S2CR 18/34 LBL использовалась для позиционирования экспериментального кластера Байкальского нейтринного телескопа НТ1000 [11]. Система позиционирования также учитывала вертикальный разрез скорости звука. При этом, для расчета нелинейности траекторий распространения сигнала использовалось упрощающее предположение о монотонности изменения глубины изолинии дальности с увеличением угла к трассе распространения сигнала и алгоритм дихотомического уточнения первоначального интервала координат в ходе следующих итераций по уточнению положения объекта позиционирования (подробности в [11]). Некоторые результаты практической работы ДБ системы позиционирования на экспериментальном кластере Байкальского нейтринного телескопа представлены на рис. 8.

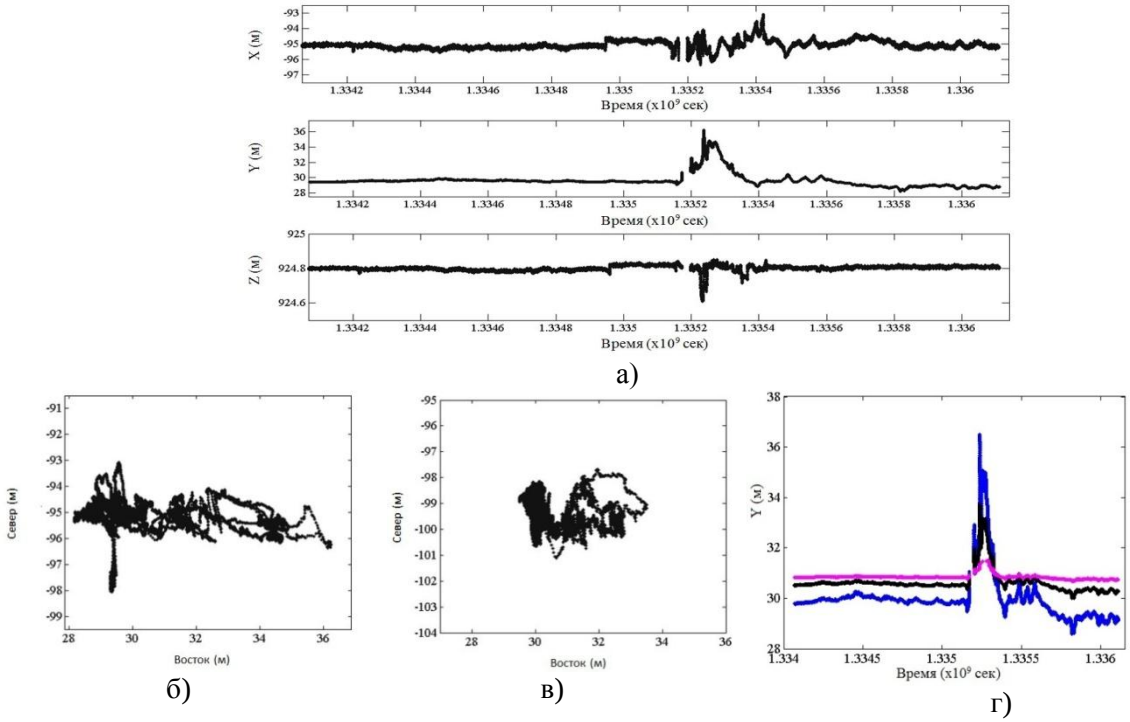


Рис. 8. Результаты практической работы ДБ системы позиционирования

На рис. 8а представлены результаты измерения координат *(X,Y,Z)* транспондера в толще воды на расстоянии 431 м от плоскости ДБ антенны. В начальной части рисунка отмечаются незначительные изменения координат транспондера (в пределах одного метра). В дальнейшем, в течение 5 дней обнаруживаются существенные изменения координат: смещения транспондера от устойчивого положения достигали 7 метров. На рис. 8б представлены кривые перемещения этого транспондера в плоскости *(X,Y)*. Устойчивое положение транспондера находится в окрестности точки с координатами (104.1 м, 29.6 м). В период наибольшей динамики транспондер испытывает быстрые изменения положения с отклонениями от этой точки в восточном направлении до координат (105.5 м, 36.5 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться транспондер, превышал 8 метров по сечению запад-восток и 3 метров по сечению север-юг. На рис. 8в приводятся результаты измерения координат *(X,Y,Z)* транспондера в толще воды на расстоянии 266 м от плоскости ДБ антенны. При устойчивом положении в окрестности точки (110 м, 30.5 м) отклонения в период наибольшей динамики в восточном направлении достигали координаты (109.3 м, 33.8 м). Размер пятна, в пределах которого мог находиться транспондер, превышал 4 метра по сечению запад-восток и 2.7 метра по сечению север-юг. Меньший размер пятна обусловлен расположением этого транспондера на заякоренной гирлянде ниже, чем предыдущий транспондер (радиус вращения, обусловленный механическим закреплением, действительно, был меньше). На рис. 8г приводятся *Y*-координаты трех транспондеров, расположенных на одной гирлянде в зависимости от времени наблюдения. Как следует из рисунка, направления перемещения транспондеров на разных глубинах хорошо согласованы. Из сопоставления аналогичных кривых для транспондеров, расположенных на других гирляндах, следовала синхронность перемещений оборудования на всех гирляндах нейтринного телескопа.

Всего в 2012 году системой позиционирования было выполнено более 65.000 измерений местоположения каждого из объектов позиционирования, и, соответственно, проведено такое же количество сеансов цифровой гидроакустической связи между станциями и объектами позиционирования (при номинальной скорости передачи цифровой информации 1 кбит/с). Полученные результаты подтвердили высокую надежность

функционирования интегрированной системы ДБ позиционированного и цифровой гидроакустической связи.

Обсуждение

В ходе исследований по созданию комбинированной системы УКБ и ДБ позиционирования все его основные составляющие (УКБ трансиверы, ДБ трансиверы, гидроакустические модемы) подвергнуты тщательному тестированию в различных условиях гидроакустической среды.

Точность УКБ позиционирования, определяемая по стандартному отклонению (Drms), составила порядка 0.1% от наклонной дальности до объекта позиционирования, что обеспечивает высокие требования по отслеживанию текущих координат «свободных» трансиверов ДБ антенны в толще воды. В частности, при заглублении (длине кабеля) ДБ трансивера порядка 100 м, точность его позиционирования с помощью приповерхностного УКБ трансивера составляет порядка 10 см. При этом, продемонстрированная точность ДБ позиционирования транспондера на расстоянии сотен метров имеет порядок миллиметров. Ожидается, что при высокой точности дифференциального GPS, обеспечивающего геопривязку приповерхностных/подледных УКБ трансиверов, итоговая точность комбинированной системы УКБ и ДБ позиционирования будет определяется точностью УКБ трансивера и составлять порядка десяти (десятков) сантиметров.

Передача данных одновременно с точным позиционированием удаленного абонента цифровой гидроакустической связи способна обеспечить возможность управления подводным аппаратом по текущим данным позиционирования в реальном времени (или масштабе, близком к реально-временному).

Практическое применение комбинированной системы УКБ и ДБ позиционирования способно повысить точность выполнения операций АНПА, работающих на большой глубине или подо льдом в режиме «автономности под надзором», не прибегая к трудоемкому развертыванию и затратному поддержанию работоспособности ДБ антенн с донным расположением трансиверов.

Раздел благодарностей

Авторы выражают благодарность Байкальской коллаборации за организацию и возможность проведения гидроакустических экспериментов на инфраструктуре нейтринного телескопа, плодотворные дискуссии и полезные практические советы.

Литература

1. Tan H.-P., Diamant R., Seah W.K.G., Waldmeyer M. (2011) A Survey of Techniques and Challenges in Underwater Localization. Elsevier Journal of Ocean Engineering.
2. Bannasch R., Kebkal K.G. (2002). Process and system form information transfer. Patent No. US 6,628,724 B2.
3. Kebkal K. and Bannasch. R. (2003). Sweep-Spread Carrier for Underwater Communication over Acoustic Channels with Strong Multipath Propagation. Journal of Acoustic Society of America, Vol.112, issue 5, pp. 2043-2052.
4. Спецификация на изделие S2CR 40/80 USBL. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr_42_65_usbl.html.
5. Спецификация на изделие S2CR 40/80. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cr_42_65.html.
6. Спецификация на изделие S2CR 48/78 USBL. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr_48_78_usbl.html.

7. Спецификация на изделие S2CR 48/78. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cr_48_78.html.
8. Спецификация на изделие S2CR 7/17. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cr_7_17.html
9. Спецификация на изделие S2CR 7/17 USBL. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr_7_17_usbl.html.
10. Спецификация на изделие S2CR 18/34 LBL. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.evologics.de/en/products/LBL/index.html.
11. Аврорин и др. Гидроакустическая система позиционирования экспериментального кластера нейтринного телескопа масштаба кубического километра на озере Байкал // Приборы и техника эксперимента, 2013, № 4, с. 87–97.

ИНТЕГРИРОВАННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ СИСТЕМА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ И ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЕЁ АБОНЕНТОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

А.Г. Кебкал, К.Г. Кебкал, М.А. Комар

EvoLogics GmbH, Ackerstrasse 76, 13355 Berlin, Germany
Email: kebkal@evologics.de

Поскольку развертывание/свертывание и поддержание функционирования множества гидроакустических устройств связано с большими затратами времени и материальных средств, разработку и внедрение специализированных/пользовательских протоколов верхнего уровня целесообразно осуществлять с помощью развитых средств эмуляции функций гидроакустического устройства и имитации основных эффектов среды распространения гидроакустического сигнала. Статья описывает функциональные возможности реально-временного эмулятора интегрированного устройства цифровой гидроакустической связи и ультракороткобазового позиционирования. Основное внимание уделено описанию эмулятора устройства в части цифровой гидроакустической связи (гидроакустического модема). Эмулятор обеспечивает полную поддержку всех функций канального уровня модема и ультракороткобазового позиционирования, а также включает в себя упрощенный имитатор физического уровня, обеспечивающий учет основных эффектов среды распространения сигнала, в частности, задержек распространения сигнала для заданной пользователем топологии источников/получателей, эффект многолучевого распространения, интенсивность случайных коллизий пакетов данных при их приеме, позволяющий задавать интенсивность сбоев синхронизации при приеме пакетов, интенсивности битовых и пакетных ошибок, учитывать траекторию и оценивать доплеровские сдвиги сигналов при движении источника/получателя данных. Таким образом, эмулятор заменяет физическое устройство на этапе разработки пользовательских сценариев и разработки и тестировании протоколов и приложений верхнего уровня. Кроме того, эмулятор обеспечивает полнофункциональную поддержку механизма межуровневой синхронизации устройства, позволяющий разрабатывать пользовательские протоколы позиционирования удаленных абонентов связи, а также гибридные протоколы позиционирования и связи, управляемые протоколами верхнего уровня.

Введение

Современные гидроакустические модемы являются сложными устройствами, предназначенными для решения широкого круга практических задач. Часто, кроме приемоизлучателя, они также оснащаются решеткой гидрофонов, позволяющей выполнять ультракороткобазовое позиционирование удаленного абонента связи, что существенно упрощает решение задач по поддержанию формации и координированию маневров группы автономных необитаемых подводных аппаратов, точному позиционированию узлов распределенной гидроакустической сети. Большинство из этих приложений являются уникальными, и каждое требует разработки сложного программного обеспечения с внедрением пользовательских протоколов для обмена данными между всеми ее отправителями-получателями. Программное обеспечение должно отвечать строгим требования по надежности и должно подвергаться всестороннему долгосрочному тестированию.

Существующие имитаторы сетей, например, NS2Miracle [1], являются полезными инструментами для исследований и тренировок, но они не являются достаточными для полноценной разработки программного обеспечения, в том числе проектирования алгоритмов, моделирования, верификации и тестирования целевой системы. Существенный шаг вперед был сделан с появлением нескольких расширений имитаторов сети, таких как Sunset [2] и Desert [3], которые позволяют подключение, не виртуальных, а физических устройств (гидроакустических модемов) в рамках исследовательских стендов, обеспечивая

замену процессов имитации физического и канального уровней гидроакустических модемов, на процессы, протекающие при функционировании физического устройства. Тем не менее, такой подход имеет существенные недостатки. Многократное развертывание/свертывание оборудования в море в масштабе практического интереса для разработки пользовательских сценариев, моделирования и верификации моделей, первичного тестирования разработанных протоколов, – связано со множеством ограничений, в частности, по погоде, а также со множеством трудовых и материальных затрат. Кроме того, в существующих имитаторах сетей, в частности, NS2Miracle, отсутствует поддержка физического и канального уровня протоколов коммерчески доступных гидроакустических модемов. Это обуславливает необходимость разработки пользователем различных программ для работы на имитаторе на физическом устройстве: разница в интерфейсах и форматах на имитаторе и в аппаратных средствах обуславливают существенные различия в реализациях одного и того же протокола верхнего уровня.

В этой статье представлена разработка реально-временного эмулятора интегрированного устройства цифровой гидроакустической связи и ультракороткобазового позиционирования серии S2CR компании EvoLogics. Эмулятор обеспечивает полнофункциональную эмуляцию канального уровня устройства серии S2CR и включает в себя упрощенный имитатор физического уровня, обеспечивающий учет основных эффектов среды распространения сигнала, в частности, задержек распространения сигнала для заданной пользователем топологии источников/получателей, эффект многолучевого распространения, интенсивность случайных коллизий пакетов данных при их приеме, позволяющий задавать интенсивность сбоев синхронизации при приеме пакетов, интенсивности битовых и пакетных ошибок, учитывать траекторию и оценивать доплеровские сдвиги сигналов при движении источника/получателя данных.Эмулятор способен полностью заменить набор физических устройств при разработке, верификации и тестировании пользовательских сценариев, например, может служить в качестве автономного решения для разработки и проверки пользовательских протоколов сетевого уровня. Эмулятор полностью поддерживает механизмы межуровневой синхронизации, реализованые в физических устройствах серии S2CR, и, таким образом, позволяет разрабатывать пользовательские протоколы позиционирования, гибридные протоколы обмена данными и позиционирования участников сети, управляемые протоколами верхнего уровня.

В следующих разделах представлены сведения о возможностях использования пользовательских программ, разработанных с помощью эмулятора, на реальном аппаратном оборудовании – гидроакустических модемах. Статья организована следующим образом. Раздел II описывает стек протоколов устройств серии S2CR. В разделе III представлена концепция эмулятора. В разделе IV рассмотрены практические вопросы: от моделирования пользовательских сценариев доморских испытаний. Раздел V описывает практический опыт применения эмулятора. В разделе VI изложены планы по его развитию.

Стек протоколов гидроакустических модемов серии S2CR

Гидроакустические модемы серии S2CR компании EvoLogicsGmbH содержат следующие основные компоненты: гидроакустический приемоизлучатель, силовой модуль (предусилитель и усилитель мощности), процессорный модуль, антенна с ультракороткой базой (опция), модуль «побудки» электроники модема – WakeUp (опция).

Физические характеристики приемоизлучателя определяют частотный диапазон и тип диаграммы направленности гидроакустического модема, и соответственно, особенности применения, для каждого их которых может быть рекомендована та или иная модель. Гидроакустический модем содержит предусилитель и усилитель мощности, тщательно согласованные с характеристиками приемоизлучателя. Необязательный модуль ультракороткобазовой антенны представляет собой решетку из пяти гидрофонов,

расположенных в одном корпусе с приемоизлучателем, а также пятиканальный предусилитель для гидрофонов антенны. Модуль «побудки» электроники модема – WakeUpявляется дополнительным электронным модулем, позволяющий оптимизировать энергопотребление. При наличии этого модуля вся электроника модема, кроме модуля WakeUp, отключена от источника питания, и только после обнаружения электронного (со стороны аппаратного интерфейса) или гидроакустического сигнала «побудки», электроника подключается к источнику питания и остается во включенном состоянии на период обмена данными, после чего снова выключается.

Процессорный модуль, состоит из АЦП, ЦАП, сигнального процессора и ПЛИСа, которые реализуют протокол физического уровня (далее по тексту – S2CPhy), а также двух дополнительных процессоров, реализующие протокол канального уровня D-MAC. Оба протокола описаны в разделах ниже.

Протокол физического уровня S2CPhy

На физическом уровне реализован запатентованный метод модуляции сигнала, состоящий в непрерывном расширении спектра фазоманипулированного сигнала – SweepSpreadCarrier (S2C). Метод основан на предположении, что в гидроакустическом канале поступающий на прием сигнал хорошо описывается суммой множества лучевых компонентов со случайными амплитудами и фазами и профиль интенсивности многолучевого распространения является дискретным. Для таких условий наиболее перспективный подход к формированию сигнала связи состоит в расширении его спектра в широком диапазоне частот. Сигнал с расширением спектра характеризуется автокорреляционным откликом малой длительности. Причем, чем больше расширение сигнала, тем короче отклик. После распространения в гидроакустическом канале принимаемый сигнал представляет собой сумму множества задержанных лучей и на выходе согласованного фильтра может быть представлен в виде ряда смещенных на различное время корреляционных откликов. Для сигналов с большим расширением спектра, отклики могут быть изолированы и, благодаря этому, искажения, связанные с взаимодействием лучей, подавлены. В частности, фазовый шум изолированного луча может быть существенно ослаблен. В идеализированном случае искажения сигнала равны искажениям (одного единственного) изолированного луча, которые обуславливаются только шумом окружающей среды и допплеровским сдвигом (т.е. не спектром допплеровских частот, как в других методах, а одной единственной допплеровской частотой, ассоциированной с одним единственным путем распространения сигнала).

В технологии S2C используется непрерывное изменение несущей частоты сигнала, при этом информация кодируется путем дискретной манипуляции одного или нескольких параметров такой несущей. В отличие от сигналов, которые используются сегодня в цифровой ГА связи, сигнал, формируемый в соответствии с этой технологией, содержит два уровня модуляции: один – внутренний – для непрерывного изменения частоты несущей (аналоговая модуляция), второй – внешний – для задания информационного содержания сигнала (дискретная манипуляция). При ширине полосы от единиц до десятков кГц длительность такого сигнала может составлять сотни мкс, а скорость передачи – от единиц до десятков кбит/с. Не смотря на такую высокую скорость передачи приемник обычно способен успешно восстановить передаваемую информацию: вследствие непрерывной развертки несущей мгновенные частоты задержанных лучевых компонентов принимаемого сигнала смещены по отношению к мгновенным частотам уже поступивших лучей. Вследствие этого частотно-селективные искажения принимаемого сигнала ослаблены. Это обуславливает более высокую достоверность, скорость и частотную эффективность передачи данных. Защищенность от помех (вследствие ослабления влияния задержанных лучей) позволяет также отказаться от протяженных антенн (формирователей диаграммы), что обуславливает снижение энергозатрат и габаритов приемо-передающих устройств.

Основныепроцедуры, отличающие технологию S2C от других, осуществляются на физическом уровне –S2CPhy. Протоколы физического уровня реализованы на сигнальном процессоре и процессорной матрице ПЛИС и выполняют следующие функции:

1) оценку характеристик гидроакустического канала:

– построение профиля интенсивности многолучевого распространения (оценки интенсивностей и избыточных задержек распространения лучей);

– выбор наиболее энерговесомого луча для синхронизации с ним приемника;

– определение задержки распространения и доплеровского сдвига наиболее энерговесомого луча;

2) кадровую и символьную синхронизацию:

– оценку времени начала и завершения пакета данных;

– оценку времени поступления каждого из сигналов последовательности (с учетом доплеровского сдвига);

3) модуляцию:

– форматирование передаваемых данных (преобразования последовательности байт в последовательность слов в соответствии с кратностью манипуляции, в частности, преобразования в последовательность битовых пар);

– задание формы сигнала в соответствии с выбранным способом модуляции (в частности, двукратной относительной фазовой манипуляции);

– задание формы сигнала в соответствии с формой развертки несущей.

4) демодуляцию:

– согласованную синхронной обработки принимаемых сигналов с синфазной и квадратурной составляющими опорного сигнала;

– оценку комплексной огибающей принимаемого сигнала;

– оценку дискретного значения сигнала;

– определения битовой пары, соответствующей дискретному значению фазы принятого сигнала.

5) позиционирование:

– оценку импульсного отклика канала для выбора многолучевого компонента, соответствующего кратчайшему пути распространения сигнала;

– определение разницы во времени между фронтами гидроакустического сигнала, поступающего на гидрофоны ультракороткобазовой антенны.

Протокол канального уровня D-MAC

Протокол канального уровня, называемыйD-MAC, основан на множестве разнородных алгоритмов доставки данных, реализованных в гидроакустических модемах технологии S2C. В соответствии с новейшим протоколом канального уровня, поддерживается обмен двумя существенно различными типами данных: пакетных данных и, так называемых, срочных сообщений [4].

Пакетные данные. При установлении соединения для доставки пакетных данных требуется оценка параметров гидроакустического канала. Как описано в [5], алгоритм доставки данных решает задачу оптимизации параметров передаваемого сигнала для данных условий канала, непрерывно адаптируя скорость передачи данных до максимально возможного значения при заданной пользователем допустимой интенсивности битовой ошибки. Все данные, получаемые от источника в буфер динамически разбиваются на меньшие по размеру пакеты (в соответствии с текущими характеристиками канала). На стороне приемника соответствующий алгоритм собирает пакеты, восстанавливает порядок их следования и посылает принятые данные получателю в исходном формате.

Срочные сообщения. Для доставки срочных сообщений установление соединения не требуется. Для передачи коротких срочных сообщений используется фиксированная скорость передачи данных (относительно низкая и приемлемая для широкого набора характеристик гидроакустического канала [4]).Несмотря на сравнительно невысокую

скорость передачи, устранение необходимости устанавливать сообщение сильно минимизирует время доставки короткого сообщения. Доставка срочного сообщениями не прерывает текущий процесс пакетной передачи данных, так как срочные сообщения доставляются в составе (как часть) служебного сообщения, сопровождающего каждую пачку пакетов. Срочное сообщение может иметь длину $O(10^2)$ бит.

При выборе фиксированной скорости передачи данных выполнялся поиск компромисса между следующими противоречиями. С одной стороны, требование достижения низкой вероятности битовой ошибки обуславливает снижение скорости передачи данных. С другой стороны, продолжительность сообщения должна быть меньше, чем время когерентности канала [6]. Таким образом, скорость передачи данных должна быть все еще сравнительно высокой, чтобы сообщение не превышало временных ограничений накладываемых характеристиками канала. В связи с этом, на основе результатов большого множества испытаний, протокола физического уровня, реализованный в устройствах технологии S2C [7], обеспечивает надежную передачу срочных сообщений со скоростью 1 кбит/с. (Такая скорость, оказывается также оправданной, например, при работе в сложных гидроакустических каналах с высокой динамикой характеристик, в частности, при осуществлении цифровой связив мелководных водоемах между движущимися узлами гидроакустической сети).

На канальном уровне время доставки короткого сообщения может сокращаться, если отказаться от таких время затратных процедур, как «рукопожатие» и адаптация сигнала к условиях среды распространения, и если вести передачу на сравнительно небольшой фиксированной скорости связи так, чтобы вероятность появления неисправимых битовых ошибок оставалась бы на пренебрежимо малой (эта мера снизит вероятность потерь времени на повторную пересылку поврежденных сообщений).Срочные сообщения могут быть классифицированы в соответствии с типом адресации, наличием подтверждения доставки и требованием по синхронизации передачи. Таблица I содержит их классификацию.

Таблица 1. Классификация срочных сообщений

Срочное сообщение					
Асинхронное			Синхронное		
надежное	одноадресное	широко-вещательное	робастное	одноадресное	широко-вещательное

В отсутствие текущего обмена пакетными данными между узлами гидроакустический сети асинхронные срочные сообщения доставляются на основе схемы, подобной схеме ALOHA. Во время обмена пакетными данными между узлами сети асинхронные срочные сообщения могут доставляться как часть служебного сообщения.

Управление доступом к среде для синхронных срочных сообщений должно быть реализовано протоколом верхнего уровня. Для выполнения этой задачи, D-MAC протокол реализует пользовательский интерфейс для синхронизации с физическим уровнем, что позволяет протоколам верхнего уровня указывать на время передачи синхронного срочного сообщения, а также получать сообщение о времени поступления такого сообщения в приемный тракт. Синхронные срочные сообщения не могут передаваться при обмене пакетными данными.

Концепция эмулятора устройства цифровой гидроакустической связи и позиционирования

Основной целью эмулятора модема является сведение к минимуму затрат на разработку пользовательских протоколов верхнего уровня, а также упрощение и ускорение процесса интеграции гидроакустических модемов с разнообразными источниками/получателями данных.

Основное внимание при конструировании эмулятора уделялось обеспечению возможности переноса разработанного на нем приложения на реальное физическое устройство без какого-либо изменения кода. Это обстоятельство определяло следующие требования к создаваемому эмулятору:

– реально-временную эмуляцию большого числа узлов гидроакустической сети;

– идентичность исходного кода, как для эмулятора, так и для «прошивки» на физическом устройстве;

– одинаковый набор команд для эмулятора и физического устройства;

– возможность удаленного доступа к эмулятору через Интернет.

Требование к обеспечению режима реального времени определилось непосредственно из основной цели создания эмулятора. Временные диаграммы работы на эмуляторе и на физическом устройстве должны были точно совпадать для обеспечения одинаковости работы протоколов верхнего уровня как на эмуляторе, так и на модеме. Следует принять во внимание, что протоколы верхнего уровня могут использовать функции модема, как для обмена данными, так и измерения задержек распространения сигнала, и соответственно решения задач позиционирования параллельно с обменом данными или в его отсутствие.

«Прошивка» модема постоянно развивается с увеличением числа задач по интеграции гидроакустических модемов с внешними сенсорами и системами, ассортимент которых быстро растет. Стек протоколов канального уровня представляет собой тот слой, который претерпевает наибольшее число изменений, и является наиболее "видимым" для протоколов верхнего уровня.

Для обеспечения требования по идентичности исходного кода, запускаемого на эмуляторе и модеме, эффективный подход к созданию эмулятора состоял в выделении платформенно-зависимой части кода в компактный драйвер, реализованный в двух вариантах,– один для прошивки модема, а другой для использования в эмуляторе. Следует отметить, что такой подход к созданию эмулятора также гарантирует идентичность набора управляющих команд, что для создания протоколов верхнего уровня делает неотличимым работу с эмулятором от работы с реальным модемом.

Множество экземпляров эмулятора гидроакустического модема может быть сконфигурировано и одновременно запущено на сервере производителя, например, для формирования сети. Каждый модем может быть доступен через TCP/IP сокет, что обеспечивает удаленный доступ пользователя ко всем ее элементам. Такой подход обеспечивает возможность гибкого обновления эмулятора и делает использование эмулятора независимым от платформы: пользователю не требуется никакого оборудования для установки и запуска эмулятора.

В соответствии с целями конструирования эмулятора, его основными составляющими должны быть: 1) модуль канального уровня, 2) модуль управления обменом данными между канальным и физическим уровнями, 3) имитатор физического уровня и 4) имитатор гидроакустического канала.

Как упоминалось выше, как эмулятор, так и реальный гидроакустический модем, использует тот же самый исходный код протокола канального уровня, скомпилированный для целевой платформы. Поддерживаемыми платформами являются ARM,x86, x86_64.Такой подход экономит время и усилия, затрачиваемые на поддержку и развитие эмулятора, обеспечивает полную совместимость протоколов канального уровня эмулятора и реального модема, сокращает время интеграции модемов с сенсорными системами или достижения целей научно-исследовательских проектов, сокращает путь от моделирования до окончательных морских испытаний. Межуровневый интерфейс между канальным и физическим уровнями обеспечивается драйвером ядра Linux, реализующим платформенно-зависимый код, специфичный для аппаратной части гидроакустического модема. Этот код обеспечивает низкоуровневый доступ к интерфейсу обмена данными канального и физического уровней. В эмуляторе, этот драйвер перенаправляет запросы протокола канального уровня в пользовательское пространство имитатора физического уровня и от

имитатора назад протоколу канального уровня. Такое исполнение с разделением на платформенно-зависимый код и платформенно-независимый (POSIX-совместимый)код обеспечивает возможность работы одного и того же кода на платформе эмулятора и на платформе реального гидроакустического модема. Влияние гидроакустической среды имитируется ответами на запросы протокола канального уровня в соответствии со спецификацией на межуровневый интерфейс. Пользовательскими параметрами работы имитатора являются, в частности, трехмерные координаты каждого из модемов, а также вероятности битовых ошибок при обмене данными между ними. Имитатор направляет данные, предназначенные для передачи, диспетчеру, который начинает процесс обмена данными между эмулируемыми модемами. Имитатор расставляет метки времени на каждый из передаваемых пакетов координаты отправителя. После поступления данных от диспетчера имитатор физического уровня имитирует задержку распространения сигнала, удерживая пакет в очереди на передачу в течение тайм-аута, соответствующего дальности распространения сигнала между координатами эмулируемых модемов, а также детектирует коллизии, забраковывая соответствующие пакеты данных (считая их неисправимо поврежденными). Кроме осредненной по глубине скорости звука, эмулятор предполагает возможность задания вертикального разреза скорости звука, обеспечивая таким образом возможность разработки и тестирования пользовательских приложений, способных учитывать разрезы скорости звука, например, для повышения точности позиционирования удаленных абонентов связи. Последняя составляющая – имитатор гидроакустического канала –представляет собой диспетчер пакетов канального уровня. Основная функция этой составляющей состоит в получении пакетов от протокола канального уровня и их перенаправление к имитатору/имитаторам физического уровня, подключенным к диспетчеру.

От эмуляции к морским испытаниям

В большинстве публикаций по протоколам цифровой связи, разработанным для гидроакустических сенсорных сетей, экспериментальные результаты были получены на широко известных имитаторах сетей NS2 и NS3. Результаты же, получаемые в ходе работ в реальной гидроакустической среде, например, в озере или в море, являются редкими исключениями. Одним из важнейших препятствий для проведения физических экспериментов является их высокая стоимость, в частности стоимость подводного оборудования и стоимость работы обеспечивающего судна. Кроме этого, есть также другой сдерживающий фактор, а именно существенное различие между протоколами, создаваемыми для моделирования, и протоколами, создаваемыми для физических экспериментов.

Большой шаг вперед для перехода от моделирования к физическим экспериментам был сделан с выпуском интегрированных сред, реализующих протоколы сетевого уровня, в частности, недавних открытых релизовSunset иDesert, основанных на расширении NS2-Miricle [1], уже способных к работе с физическим оборудованием. Однако, оказалось, что даже с использованием этих релизов реалистичным является выполнение экспериментов все еще только в стендовых условиях. Проведение физических испытаний в условиях моря является чрезмерно трудоемкой и затратной задачей. В особенности, с ростом числа узлов гидроакустической сети, время на их развертывание и свертывание на большом пространстве, а также доступ к каждому из устройств для выполнения всевозможных настроек, занимает основную часть времени, обычно отводимую на эксперименты, так, что на выполнение собственно задач по разработке пользовательских приложений времени не остается.

Таким образом обнаружился серьезный недостаток интегрированных сред, реализующих протоколы сетевого уровня, состоящий в отсутствии возможности подключения к ним, кроме физического устройства, также эмулятора полнофункционального гидроакустического модема.

При подключении такого эмулятора к интегрированной среде, реализующей протоколов сетевого уровня, устраняется необходимость трудоемкого развертывания физических устройств в реальной среде, по крайней мере, на начальных этапах разработки и тестирования пользовательских приложений, а количество и масштабы возможных тестовых сценариев может увеличиваться до произвольных размеров. В частности:

– эмулятор позволяет задавать произвольные расстояния и, соответственно, задержки распространения между узлами гидроакустической сети (что является достаточно сложным при развертывании реальных модемов на сравнительно больших расстояниях– расстояниях наибольшего практического интереса);

– эмулятор поддерживает в реальном времени тестирование большого числа гидроакустических акустических модемов – узлов гидроакустической сети – за один раз, в то время, как уже само приобретение за один раз десятков модемов, аккумуляторов, буем, якорных цепей и других аксессуаров, представляется непозволительной роскошью для большинства организаций – разработчиков сетевых протокол и других пользовательских приложений;

– эмулятор полностью поддерживает межуровневый интерфейс модемов и межуровневые механизмы синхронизации, необходимые для реализации пользовательских протоколов позиционирования, таким образом, существенно снижая трудозатраты для разработки и тестирования реальных приложений на различных этапах работы;

– имитатор физического уровня обеспечивает обнаружение коллизий, задание пользователем вероятностей ошибки демодуляции и ошибок синхронизации, позволяет тестировать приложения и протоколы верхнего уровняв различных условиях эксплуатации и отлаживать программное обеспечение без привлечения дорогостоящих гидроакустических устройств и другого подводного оборудования.

Следующим шагом, упрощающим путь от моделирования до морских испытаний, стал выпуск специальной версии гидроакустических модемов белой линии (WiteLineScienceEdition). Они предоставляют пользователю специальную «прошивку» с размещением открытого для пользователя экспериментального пространства („sandbox”), позволяющего пользовательские запускать прямо в процессорном модуле модема собственные приложения и протоколы верхнего уровня. В экспериментальном пространстве могут запускаться скрипты TCL/Expect, например, для быстрого прототипирования тестовых сценариев и приложений, а также приложения, написанные в C/C++, или протоколы, написанные в рамках интегрированных сред, реализующих протоколы сетевого уровня, в частности, Sunset иDesert.

Опыт использования

Эмулятор гидроакустического модема серии S2CR подвергался бета-тестированию на протяжении двух лет. Различные университетские группы получали доступ к эмулятору для разработки и отладки протоколов верхнего уровня и подготовки к совместным экспериментам. Кроме того, коммерческие заказчики приобретали доступ к эмулятору для ознакомления с интерфейсами и функциями гидроакустических модемов и разработки скриптов, позволяющих интегрировать модемы с их сенсорными системами задолго до поставки физических устройств.

В августе 2012 года авторы статьи провели ряд совместные испытаний с группой SIGNET из университета Падуи (Италия).Целью исследования была проверка динамического протокола маршрутизацииSUN, разработанного группой SIGNET специально для гидроакустических сенсорных сетей и представленного в работе [8]. В ходе подготовки морских испытаний группе предоставлялся доступ к эмулятору гидроакустического модема. Посредством удаленного доступа они использовали его для отладки и тестирования протокола SUNв рамках интегрированной среды, реализующей протоколы сетевого уровня, NS-Miricle. Благодаря предварительной отладке программного обеспечения на эмуляторе,

непосредственная подготовка и переход к морским экспериментам с использованием физических устройств пошли быстро, что обеспечило возможность исследования большого набора пользовательских сценариев в различных условиях гидроакустического канала [8].

В течение экспериментов, группа участников подтвердили практичность применение эмулятора, и сделали следующие выводы [9]:

– эмулятор представляет собой средство обучения, так как он позволяет получить опыт работы с обширным набором AT команд гидроакустических модемов серии S2CR;

– эмулятор обеспечивает возможность конструирования и тщательной отладки программ, предусматривающих сложное взаимодействие с модемом; в частности, эмулятор может быть использован для верификации и совершенствования высокоразвитых сетевых протоколов и приложений, которые включают в себя многократные обмены сообщениями с модемом, например, в соответствии с алгоритмом специально сконструированного конечного автомата;

– эмулятор позволяет верифицировать собственные сетевые протоколы и/или приложения в отсутствие физических модемов, напрямую связанных с компьютером разработчика; при этом число виртуальных (эмулируемых) модемов может быть произвольно большим и работа с эмулятором может выполняться через удаленный доступ;

– эмулятор позволяет планировать и уточнять сценарии экспериментов до их проведения на реальном оборудовании;

– использование эмулятора экономит время отладки и верификации кода: очевидно, что изменение кода на персональном компьютере выполняется быстрее, чем изменение и проверка кода на платформы модема;

– приложения, разработанные и протестированные на эмуляторе, быстро экспортируются на платформу реального гидроакустического модема.

Перспективы развития

Эмулятор гидроакустического модема находится в состоянии постоянного развития, поскольку растущий опыт его применения обуславливает появление новых конструктивных идей для усовершенствования исходной концепции. Воспользовавшись эмулятором, партнеры и заказчики способствовали появлению идей по развитию и внедрению следующего:

– перехода от настройки параметров эмулятора из командной строки к настройке через веб-утилиту (графический конфигуратор);

– разработки графического конструктора, позволяющего создавать хорошо обозримые топологии сети;

– разработать инструмент визуализации журнала событий, позволяющий просматривать и анализировать, например, потоки пакетов, временные и пространственные диаграммы поврежденных пакетов, коллизий и прочее;

– разработка средств пользовательской параметризации ошибок синхронизации и демодуляции в зависимости от расстояния между узлами гидроакустической сети;

– разработать средства для запуска эмулятора в качестве виртуальной машины на компьютере пользователя.

Выводы

Создание полнофункционального эмулятора гидроакустического модема открывает широкие возможности для разработки и исследования протоколов верхнего уровня и других приложений, использующих гидроакустические модемы. Возможность тестирования и отладки приложений на эмуляторе гидроакустического модема позволяет существенно сократить затраты на разработку и повысить надежность решения, так как вложения времени в тестирование и отладку может быть существенно больше, чем во время испытаний в открытом море. Опыт использования эмулятора, как во время внутреннего тестирования, так

и в рамках партнерского сотрудничества, доказали целесообразность его практического использования. Переход от использования эмулятора к физическим экспериментам занимал обычно от нескольких дней до недели, в зависимости от сложности экспериментов. Эмулятор может быть использован либо в качестве автономного решения для исследования и сравнения различных подходов и протоколов верхнего уровня, либо в качестве дополнительного инструмента для ускорения процесса их разработки.

Литература

1. The network simulator -ns-2. Электронный ресурс. Режим доступа: http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/ User Information

2. C. Petrioli, R. Petroccia, J. Shusta, and L. Freitag, “From underwater simulation to at-sea testing using the ns-2 network simulator,” in OCEANS, 2011 IEEE -Spain, june 2011, pp. 1 –9.

3. R. Masiero, S. Azad, F. Favaro, M. Petrani, G. Toso, F. Guerra, P. Casari, and M. Zorzi, “Desert underwater: An ns-miracle-based framework to design, simulate, emulate and realize test-beds for underwater network protocols,” in OCEANS, 2012 -Yeosu, may 2012, pp. 1 –10.

4. O. Kebkal, M. Komar, K. Kebkal, and R. Bannasch, “D-mac: Media access control architecture for underwater acoustic sensor networks,” in OCEANS, 2011 IEEE -Spain, june 2011, pp. 1 –8.

5. O. Kebkal, “On the use of interwoven order of oncoming packets for reliable underwater acoustic data transfer,” in OCEANS 2009 -EUROPE, may 2009, pp. 1 –7.

6. B. Sklar, Digital communications: fundamentals and applications, ser. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series. Prentice-Hall PTR, 2001.

7. K. G. Kebkal and R. Bannasch, “Sweep-spread carrier for underwater communication over acoustic channels with strong multipath propagation,” The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 112, no. 5, pp. 2043–2052, 2002.

8. G. Toso, R. Masiero, P. Casari, O. Kebkal, M. Komar, and M. Zorzi, “Field experiments for dynamic source routing: S2c evologics modems run the sun protocol using the desert underwater libraries,” in OCEANS, 2012 -Hampton Roads, in press.

9. R. Masiero, personal communication, 2012.

РЕГУЛЯРНЫЕ ПОЧТИ-ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА МЕЛКОЙ И ГЛУБОКОЙ ВОДЕ

В.А. Щуров, А.С. Ляшков, Е.С.Ткаченко

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Тел.: (423)231-21-01;
E-mail: shchurov@poi.dvo.ru

Кафедра физики Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского.
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

Представлены результаты натурных исследований регулярных интерференционных структур на мелкой и глубокой воде. Средства исследований – одиночные четырехкомпонентные комбинированные приемники. Приведено сравнение регулярных структур акустического давления и компонент вектора интенсивности

Исследованию регулярных интерференционных скалярных структур акустического давления посвящено значительное число работ. В известной работе [1] вводится пространственный инвариант, который связывает относительные приращения координаты максимума интерференции поля давления с относительным приращением частоты излучения посредством постоянного коэффициента. Необходимо отметить, что в большинстве работ ошибочно считают, что $|p|^2$ есть интенсивность акустического поля, хотя данная величина представляет собой потенциальную энергию акустического поля. В [1] величина $|p|^2$ называется «скалярной интенсивностью». В данной работе рассматриваются регулярные структуры скалярной величины акустического давления $p^2(r,f)$, вектора мгновенной интенсивности $\vec{I}_i(r,f)$, вектора комплексной интенсивности $\vec{I}_c(r,f)$. Исследования, проведенные авторами в последние годы в мелком море, показали, что регулярный интерференционный детерминированный порядок максимумов и минимумов акустического давления связан с регулярной (почти-периодической) структурой реальной части вертикальной компоненты комплексной интенсивности. За регулярной интерференционной структурой акустического давления «стоит» механизм регулярного переноса акустической энергии «вверх-вниз» в вертикальной плоскости, что, в свою очередь, порождает вихревую структуру вектора интенсивности [2-4]. Почти-периодические структуры вектора интенсивности наблюдаются и в глубоком открытом слоистом океане от приповерхностных источников (судов). Регулярных структур акустического давления в этом случае не обнаружено, но огибающая z-компоненты интенсивности имеет почти-периодический характер в связи с явлением компенсации встречных потоков энергии поверхностного шума и интерферирующего потока энергии отраженного от дна, источником которого является поверхностный источник (судно). Таким образом, регулярные структуры от поверхностных источников возможно наблюдать и в глубоком океане. Подводные широкополосные источники образуют регулярные интерференционные структуры как в скалярном, так и в векторном полях.

Мелкое море. Методика и условия эксперимента приведены в работах [2-4], здесь будут приведены только некоторые результаты. На рис. 1 представлены сонограммы широкополосного излучения медленно идущего судна в координатах частота-время (расстояние): а – спектральная плотность акустического давления $S_{P^2}(f,t)$, в – вертикальная z-компонента $\mathrm{Re}\,S_{pV_z}(f,t)$.Глубина места – 120 м; комбинированный приемник находился на глубине 70 м; ось z направлена от поверхности к дну. На рис. 1А

светлые полосы соответствуют максимуму интерференции давления; темные полосы – минимумы давления. На рис. 1В светлые полосы соответствуют максимуму z-компоненты вектора интенсивности $\mathrm{Re}\,S_{pV_z}(f,t)$ в случае движения энергии от поверхности в сторону дна (т.е. в положительном направлении оси z); темные полосы – энергия движения от дна к поверхности (т.е. против направления оси z).

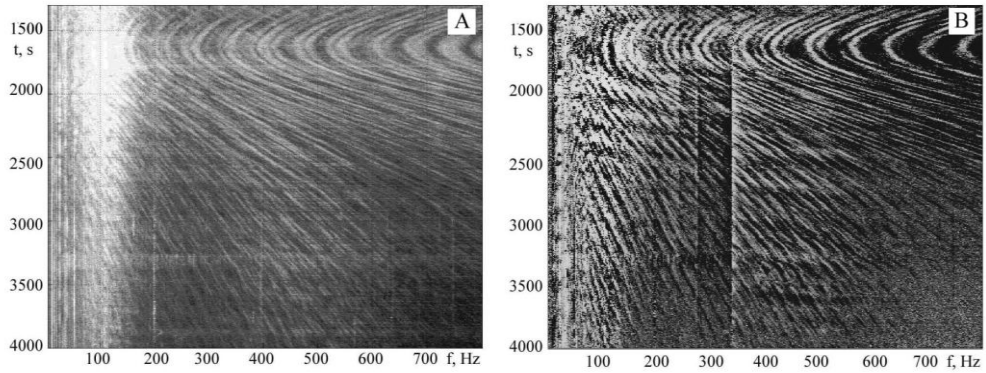


Рис. 1. Сонограммы движущегося широкополосного источника: А – спектральная плотность акустического давления $S_{P^2}(f,t)$; В – z-компонента спектральной плотности реальной части взаимного спектра $\mathrm{Re}\,S_{PV_z}(f,t)$.

На рис. 2 представлены акустические характеристики излучения судна для частоты f_0 = 23 Гц, взятые с сонограмм рис. 1: А – модуль спектральной плотности акустического давления $S_{P^2}(f_0,t)$; В – z-компонента реальной части взаимного спектра $\mathrm{Re}\,S_{pV_z}(f_0,t)$. Время t = 1800 с соответствует положению траверза (расстояние до источника излучения ~ 1000м); t = 5000 с – расстоянию ~ 6000 м.

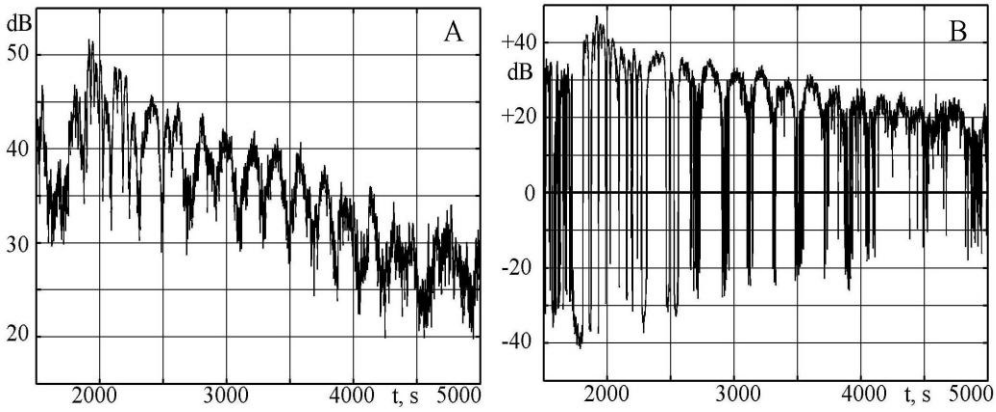


Рис.2. Зависимость от времени (расстояния): А – $S_{P^2}(f_0,t)$ – спектральная плотность акустического давления; В – $\mathrm{Re}\,S_{pV_z}(f_0,t)$ – спектральная плотность z-компоненты акустической интенсивности; f_0 = 23 Гц, полоса анализа Δf = 1,08 Гц, время усреднения Δt = 4,6 с.

Интерференционный характер зависимости $S_{P^2}(f_0,t)$ от времени (расстояния) является обычным для мелкого моря, однако регулярная смена знака на обратный $\mathrm{Re}\,S_{pV_z}(f_0,t)$ при минимальных значениях $S_{P^2}(f_0,t)$ указывает на неизвестный ранее процесс движения энергии в интерференционном поле. На рис. 2В выражение «+» дБ соответствует значениям

z-компоненты плотности потока энергии направленной вниз (к дну); «-» дБ – соответствует движению энергии от дна к поверхности. Регулярное изменение знака $\mathrm{Re}\,S_{pV_z}(f_0,t)$ с «+» на «-» приводит к тому, что вектор интенсивности $\vec{I}(f_0,t)$ может отклоняться от горизонтального направления в вертикальном поле на угол до ±60° (рис. 3). Таким образом, полный поворот вектора интенсивности в вертикальной плоскости может достигать угла 120°. Полученные в натурном эксперименте результаты [2–4] полностью совпадают с теорией [5] (рис.3).

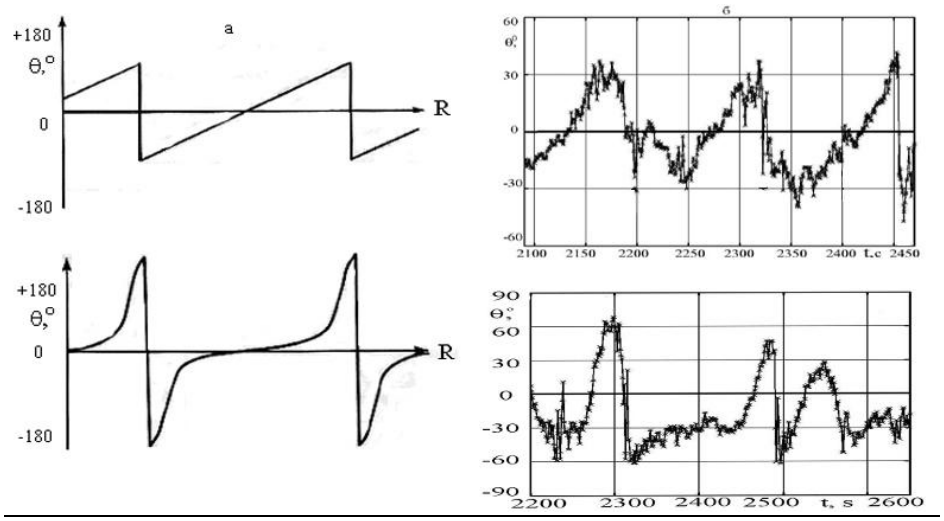


Рис. 3. Зависимость полярного угла θ вектора интенсивности от времени (расстояния):
а – теоретические кривые [5], б – экспериментальные кривые: вверху – f = 110Гц; внизу – f = 23Гц

Исследование векторных характеристик интерференционного поля мелкого моря показали, что регулярные структуры акустического давления есть отражение сложного движения акустической энергии в интерференционном поле и, что важно, связаны с вихревым движением энергии.

Глубокий открытый океан. Регулярные почти-периодические структуры $\mathrm{Re}\,S_{pV_z}(f_0,t)$ удалось обнаружить в глубоком океане, механизм образования которых связан компенсацией встречных потоков энергии и интерференцией [6]. Исследуем суперпозицию полей двух источников: движущегося локального поверхностного источника (судна) и поверхностного динамического шума. Глубина места ~4900 м; ось подводного звукового канала находилась на глубине ~1000 м; скорость звука вблизи дна превышает скорость звука у поверхности. Комбинированный приемник расположен на глубине 150 м. Маневрирование судна, как шумящего источника, было следующим. В начале эксперимента судно находилось в дрейфе на расстоянии ~1.5 км от телеметрической системы в режиме “тишина”. Затем на судне завели двигатель и шумящее судно, пройдя мимо системы с траверзным расстоянием ~1.2 км, удалилось на расстояние ~2.5 км и легло в дрейф. Время записи информации при движении судна составляет ~7 минут. Во время эксперимента в течение ~10 минут над телеметрической измерительной системой шел сильный тропический ливень, который ко времени прохода судна перешел в дождь. На рис. 4А представлена сонограмма спектральной плотности давления $S_{P^2}(f)$, на рис. 4В - $\mathrm{Re}\,S_{pV_z}(f)$. На сонограмме автоспектра $S_{P^2}(f,t)$ наблюдаются шумы дальнего судоходства в диапазоне частот 10–70 Гц по всей длине записи с уровнем ~90 дБ. При движении судна (t > 100 с) на рис. 4А виден широкополосный спектр шума судна с дискретными линиями. Интерференционных явлений в автоспектре $S_{P^2}(f,t)$ не наблюдается, поскольку источник поверхностный, но океан глубокий. Мощности излучения судна в сплошной части спектра недостаточно, чтобы в канале давления

зарегистрировать отраженный от дна широкополосный сигнал, который мог бы интерферировать с рефрагированных прямым сигналом. Однако на сонограмме $\mathrm{Re}\, S_{PV_z}(f)$ при $t > 100$ с видны периодические изменения уровня сигнала. Исследование векторных свойств результирующего потока энергии, вызванного суперпозицией полей поверхностного локального источника и поверхностного шума тропического ливня, и есть предмет данной работы. Полученный экспериментальный результат может быть описан следующим образом. Вначале рассмотрим формирование потока энергии сигнала отраженного от дна. Предположим, что в данную точку измерения приходят две плоские когерентные волны, отраженные от дна. Разность хода их такова, что в результате интерференции для ряда частот будет наблюдаться максимум или минимум взаимной спектральной плотности $S_{pV_z}(f)$. Для двух таких плоских волн одной частоты, пришедших в точку измерения, средняя величина результирующего потока плотности энергии вдоль оси z будет определяться следующим выражением:

$$I_{-z,S} = \frac{1}{2} p_1 V_1 \cos\theta_1 + \frac{1}{2} p_2 V_2 \cos\theta_2 + \frac{1}{2}\left[p_1 V_2 \cos\theta_2 + p_2 V_1 \cos\theta_1 \right] \cos(\psi_2 - \psi_1), \qquad (1)$$

где p_1, p_2, V_1, V_2 – амплитудные значения давления и колебательной скорости первой и второй волн соответственно; θ_1, θ_2 – углы, которые образуют с осью z волновые векторы первой и второй волн; $(\psi_2 - \psi_1)$ – разность фаз между акустическими давлениями или колебательными скоростями плоских волн; обозначение $I_{-z,S}$ указывает на тот факт, что поток широкополосного сигнала распространяется по направлению $-z$, т.е. от дна к поверхности.

Упростим выражение (1). Не теряя общности, будем считать, что $p_1 = p_2$ и $V_2 = V_1$. Угол θ_2 представим как сумму $\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta$. Считаем $\Delta\theta$ малым, $\sin\Delta\theta \to 0$ и $\cos\Delta\theta \to 1$. В данном приближении $\cos\theta_2 \approx \cos\theta_1 \sim 1$. Поскольку углы $\theta \sim 70°–85°$, то $\cos\theta_1 \sim 1$. Тогда выражение (1) приводится к виду

$$I_{-z,S}(f_0) = p_1 V_1 [1 + \cos(\psi_1 - \psi_2)] \qquad (2)$$

В реальном эксперименте комбинированным приемником измеряется разность $I_z(f)$ двух встречных потоков энергии $I_{+z,N}(f)$ и $I_{-z,S}$, где $I_{+z,N}(f)$ – поток энергии поверхностного динамического шума, совпадающий по направлению с осью z комбинированного приемника:

$$I_z(f) = I_{+z,N}(f) - I_{-z,S}(f).$$

Поток энергии $I_{-z,S}(f_0)$ в результате интерференции отраженных от дна лучей меняется по величине в зависимости от расстояния между излучателем и приемником. Мерой изменения его величины является разность фаз $\delta = (\psi_2 - \psi_1)$. Связь между δ и разностью фаз между давлением и колебательной скоростью в результирующем суммарном потоке энергии имеет вид:

$$\cos\Delta\varphi_z(f) = \frac{1}{2}(1 - \cos\delta),$$

откуда следует, что при $\delta = \pi$ (минимум интерференции шумоподобного сигнала) $\cos\Delta\varphi_z(f) = 1$, $\Delta\varphi_z(f) = 0°$, что непосредственно наблюдается на рис.4В.

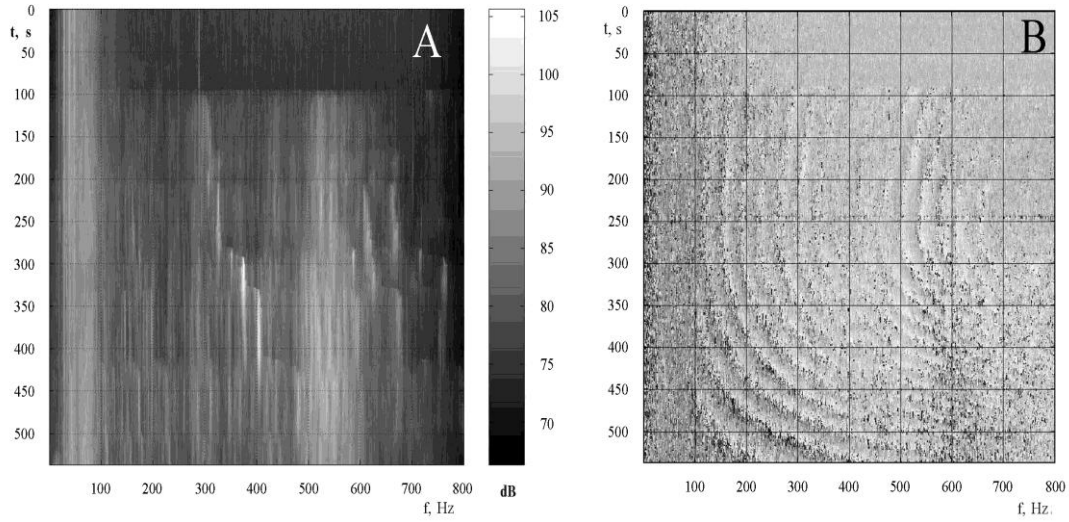


Рис. 4. Сонограммы: А – $S_{P^2}(f)$, В – $\mathrm{Re}\, S_{pV_z}(f)$. Время усреднения 15 с, полоса анализа 1,2 Гц, усреднение экспоненциальное.

Представленные результаты открывают новую возможность в исследовании фундаментальных и прикладных проблем подводной акустики.

Литература

1. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане// Акустика океана. Сб. под ред. Л.М. Бреховских. Наука. М. 1982. С. 71-91.

2. Shchurov V.A., Kuleshov V.P., Tkachenko E.S. The phase spectra of interferential wideband surface source at shallow sea. Collection of abstracts of the XXII session of Russian Acoustic Society and Session of the Scientific Counsel of the Russian Academy of Sciences on acoustics. Moscow: GEOS, №2. 2010. P. 248-251.

3. Shchurov V.A., Kouleshov V.P., Cherkasov A. V. Vortex Properties of the Acoustic Intensity Vector in a Shallow Sea // Acoust. Phys. 2011. V. 57, N 6. P. 851–856.)

4. Shchurov V. Comparison of the Vorticity of Acoustic Intensity Vector at 23 Hz and 110 Hz Frequencies in the Shallow Sea // Applied Physics Research. Canadian Center of Science and Education. V. 3, № 2. Nov. 2011. P. 179-189.

5. Елисеевнин В.А., Тужилкин Ю.И. Поток акустической мощности в волноводе// Акуст.журн. 2001. Т.47, № 6. С. 781-788.

6. Shchurov V.A., Kouleshov V.P., Tkachenko E.S., Ivanov E.N. Features Determining Compensation of Counter Energy Flows in Acoustic Fields of the Ocean // Acoust. Phys. 2010. V. 56, N 6. P. 1089–1096.

ДВИЖЕНИЕ ЭНЕРГИИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ТОНАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА В ПОЛЕ ДОННО-ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕВЕРБЕРАЦИИ

В.А. Щуров, Е.С. Ткаченко, Г.Ф. Иванова *

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН.
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел.: (423)231-21-01,
E-mail: shchurov@poi.dvo.ru

*Кафедра физики Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского.
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

Приведены результаты натурных исследований пространственных характеристик реверберации тонального импульса в условиях глубокого открытого океана. Результаты, представленные в статье, могут служить основанием для разработки методов подавления реверберационной помехи при активной локации и комбинированном приеме, а также при исследовании рассеивающих характеристик поверхности и дна океана.

Экспериментальные исследования проводились с помощью тонального импульсного ненаправленного излучения на частоте f_o=404 Гц. Длительность излучаемых импульсов τ_0=0,5 с. Временной интервал между импульсами составлял 60 с. Расстояние между излучателем, который находится на глубине 60 м, и одиночным комбинированным приемником (глубина 250 м) изменялось во время проведения эксперимента в пределах 3000–3500 м. Оси *x* и *y* комбинированного приемника располагались в горизонтальной плоскости, ось *z* направлена вертикально от поверхности ко дну. Эксперимент планировался таким образом, чтобы ненаправленный излучатель находился в окрестности максимума характеристики направленности приемного канала *x* комбинированного приемника. Во время проведения эксперимента наблюдались проходящие судна, минимальная дистанция до которых составила ~10 км. Состояние поверхности океана – четыре балла по шкале Бофорта, зыбь отсутствует. Скорость приводного ветра составляла 10 м/с. Рельеф дна в районе проведения эксперимента без особенностей – относительно ровная поверхность. Глубина места 3500 м. Скорость звука у поверхности больше, чем у дна; ось подводного звукового канала находится на глубине 1100 м.

В результате эксперимента были получены одновременные реализации мгновенных значений четырех компонент акустического поля $p(t)$, $V_x(t)$, $V_y(t)$, $V_z(t)$ в зависимости от времени *t*. Временные реализации $p(t)$, $V_x(t)$, $V_y(t)$, $V_z(t)$ выделялись при помощи цифрового фильтра в полосе Δf = 10 Гц (время усреднения – 0,1 с) на центральной частоте f_0 = 404 Гц. Предметом исследований являлись компоненты мгновенных значений плотности потока энергии от времени: $\left|p(t)V_x^*(t)\right|$, $\left|p(t)V_y^*(t)\right|$, $\left|p(t)V_z^*(t)\right|$; разности фаз акустического давления и трех компонент колебательной скорости: $\Delta\varphi_x(t)=\varphi_P-\varphi_x$, $\Delta\varphi_y(t)=\varphi_P-\varphi_y$, $\Delta\varphi_z(t)=\varphi_P-\varphi_z$; $\mathrm{Re}[p(t)V_i^*(t)]$, $\mathrm{Im}[p(t)V_i^*(t)]$ – активная и реактивная составляющие компонент комплексной интенсивности. Направления прихода прямого и рассеянного сигнала в точку приема определяются посредством азимутального и полярного углов $\psi(t)$ и $\theta(t)$:

$$\psi(t)=\mathrm{arctg}\,\mathrm{Re}\,I_y(t)\big/\mathrm{Re}\,I_x(t)\,; \qquad \theta(t)=\mathrm{arctg}\,\mathrm{Re}\,I_{xy}(t)\big/\mathrm{Re}\,I_z(t)\,,$$

где $i=x, y, z$; $V_i^*(t)$ – комплексно-сопряженные величины компонент колебательной скорости $V_i(t)$;$I_x(t)$, $I_y(t)$, $I_z(t)$ – ортогональные компоненты мгновенных значений плотности потока

энергии, $I_{xy}(t)=(I_x^2(t)+I_y^2(t))^{1/2}$ – компонента мгновенной плотности потока энергии в горизонтальной плоскости [1].

Изучен реверберационный процесс в ортогональных компонентах вектора плотности потока энергии. Осуществлялась математическая обработка единичных реализаций рассеянного тонального импульса с временем усреднения 0,1 с. Полученные в результате математической обработки характеристики реверберации являются мгновенными.

На рис. 1 приведены зависимости от времени модулей ортогональных компонент вектора плотности потока энергии процесса реверберации тонального импульса: $\left|p(t)V_z^*(t)\right|$, $\left|p(t)V_x^*(t)\right|$ и $\left|p(t)V_y^*(t)\right|$. Источник излучения находился вблизи максимума характеристики направленности оси x комбинированного приемника (азимутальный угол $\psi_0 \approx 180°$) и вблизи минимума оси y. Во всех приемных каналах наблюдаются прямой импульс, донно-поверхностные отражения прямого импульса и рассеянное поле прямого импульса на фоне подводного окружающего шума. Уровень прямого и отраженного импульсов по оси y ниже на 10–15 дБ уровней по осям x, z.

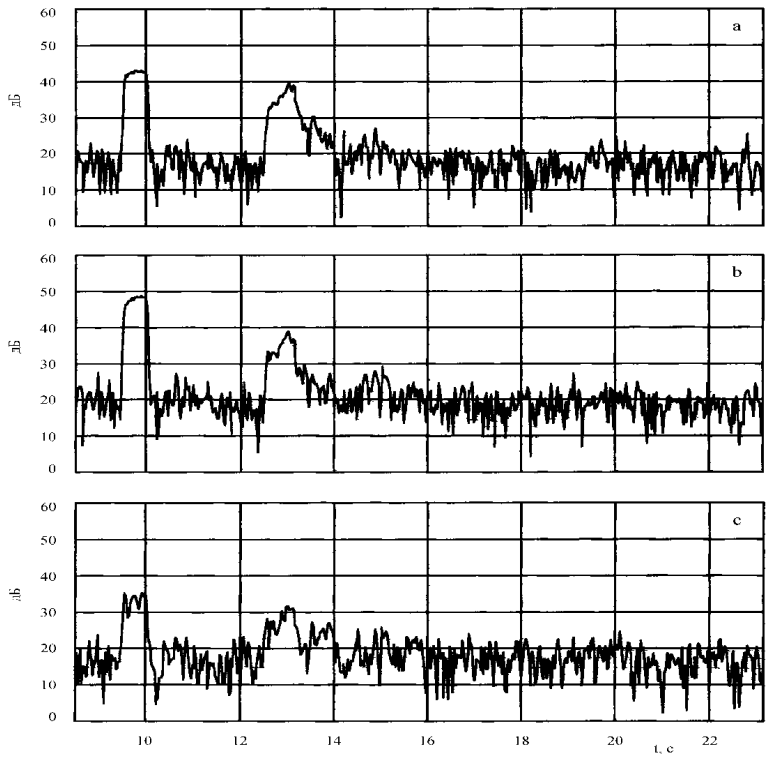


Рис. 1. Зависимость от времени ортогональных компонент вектора плотности потока энергии процесса реверберации тонального импульса: a – $\left|p(t)V_z^*(t)\right|$, b – $\left|p(t)V_x^*(t)\right|$, c – $\left|p(t)V_y^*(t)\right|$. Уровень 0 дБ выбран произвольно.

Рисунки 2, 3 подтверждают, что направление прихода на приемник прямого импульса (9,5 <t<10 с) в горизонтальной плоскости совпадает в основном с направлением –x (угол ψ_0 = 180°). В вертикальной плоскости направление прихода прямого импульса составляет с осью z угол θ = 70° (рис. 2,b), т. е. вектор потока энергии направлен от поверхности в сторону дна. На интервале времени 10 <t<12,5 с наблюдается результат обратного рассеяния от ушедшего вперед прямого сигнала.

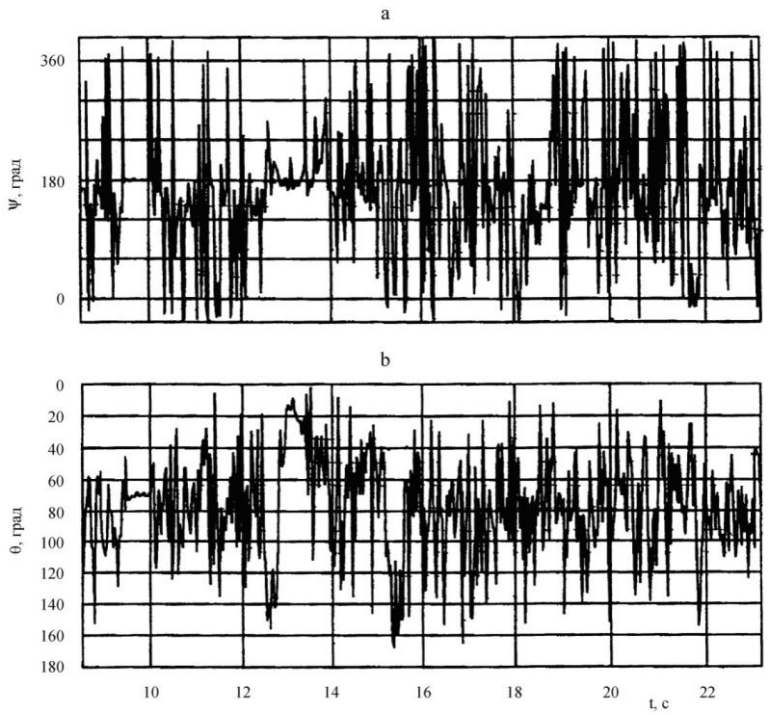


Рис. 2. Изменение азимутального угла $\psi(t)$
и полярного угла $\theta(t)$ вектора плотности потока энергии: a – $\psi(t)$, b – $\theta(t)$.

Особенно отчетливо виден сигнал при t = 11,5 с (длительность сигнала ~0,5 с, $\psi(t)=0°$, $\theta(t)=80°$. Через 3,1 с после прихода прямого импульса виден приход первого донного отражения. Время прихода t = 12,5 с. Угол прихода в вертикальной плоскости составляет 140°, т. е. вектор плотности потока энергии направлен от дна в сторону поверхности. На импульс, пришедший снизу через Δt = 0,4 с, накладывается импульс, пришедший со стороны поверхности при t = 12,9 с под углом 20° к оси z. Поверхностный импульс есть результат переотражения донного импульса на поверхности океана, поскольку прямой отраженный от поверхности импульс практически совпал с прямым импульсом. Донный импульс приходит на приемник от ограниченной озвученной площадки дна, но на поверхность океана приходят отражения от значительно большей озвученной площади дна. Донно-поверхностные отражения по осям x и y имеют различную разностно-фазовую структуру во времени (рис. 3). Значение $\Delta\varphi_x(t)$ изменяется от 0° до ±180°, т.е. отражение приходит как по направлениям $+x$, так и $-x$. Отражение по y в основном приходит с одной стороны $\Delta\varphi_y(t)$ ~ 180°, что можно объяснить рельефом дна и направлением распространения поверхностного волнения [1]. Отраженные от дна и поверхности сигналы (при t = 12,5–14 с) попадают во все каналы приема в том числе и в горизонтальный перпендикулярный направлению первичного излучения канал y. В рассеянном сигнала (при t > 14 с) по всем каналам наблюдаются устойчивые отражения (рис. 2, 3), длительность которых составляет ~ 0,5 с, т.е. равна длительности излученного сигнала.

Таким образом, использование одиночного комбинированного приемника позволяет получить объемную картину реверберации в глубоком океане, разделить донные и поверхностные источники. Существование отдельных устойчивых отражений в реверберационном поле говорит о наличии локальных рассеивателей в толще океана и на его поверхности (суда, поверхностное волнение). Предварительная обработка натурного эксперимента векторно-фазовых измерений показывает перспективность данного метода в исследовании поля реверберации импульсных сигналов. Дополнение данной обработки измерением доплеровских частот позволит расширить возможности данного метода.

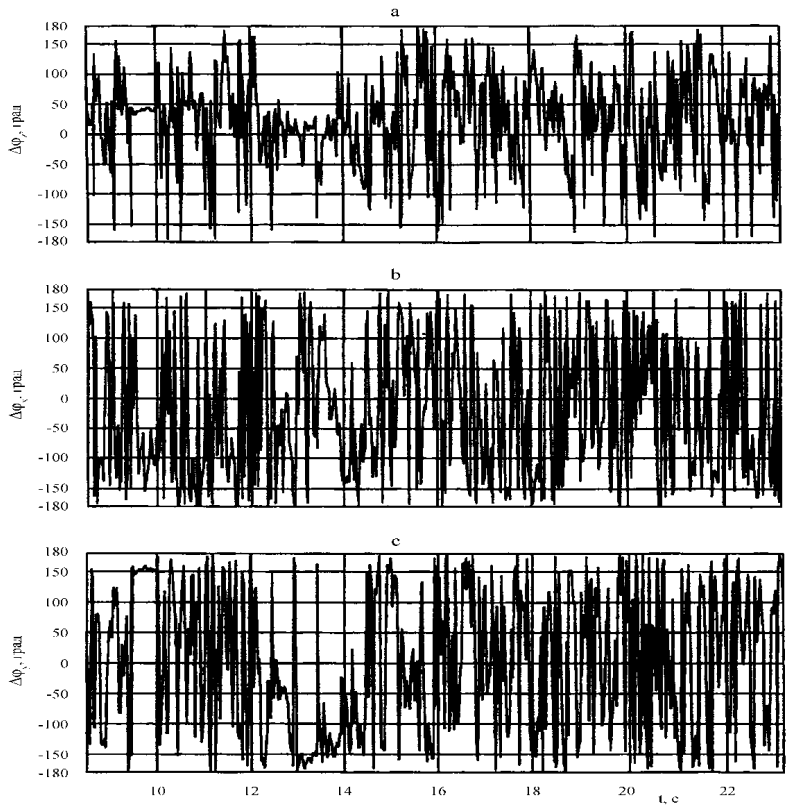


Рис. 3. Изменение разности фаз в процессе реверберации тонального импульса:

a – $\Delta\varphi_z=\varphi_p-\varphi_z$; b – $\Delta\varphi_x=\varphi_p-\varphi_x$; c – $\Delta\varphi_y=\varphi_p-\varphi_y$.

Литература

1. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток. Дальнаука. 2003. 307 с.

ЧЕТВЕРТЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ МОМЕНТ АКУСТИЧЕСКОГО ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ

В.А. Щуров, А.В. Черкасов *

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Тел.: (423)231-21-01;
E-mail: shchurov@poi.dvo.ru

*Кафедра физики Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского.
690059, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

На основе статистической теории когерентности, разработанной в оптике и радиофизике, вводится новое соотношение в векторной подводной акустике – четвертый статистический момент акустического векторного поля. Показано, что корреляционная теория когерентности может быть применена для исследования корреляционных свойств вектора интенсивности (величины второго порядка). Таким образом, когерентные свойства векторного акустического поля могут быть исследованы с помощью четвертого статистического момента, при этом мы выходим за рамки корреляционной теории второго порядка. Данный подход существенно расширяет возможности в исследовании векторных акустических полей. В статье изложены экспериментальные результаты по исследованию когерентных свойств векторного акустического поля с использованием четвертого момента интенсивности. Показано, что изменчивость уровня корреляционной функции интенсивности выше, чем у исходных величин интенсивности.

Важнейшей характеристикой векторного акустического поля является вектор плотности потока энергии (вектор интенсивности):

$$\vec{I}(f) = \left\langle p(f,t)\vec{V}(f,t)\right\rangle_t \ , \qquad (1)$$

где *p(f, t)*, $\vec{V}(f,t)$ - мгновенные значения акустического давления и вектора колебательной скорости, соответственно; знак $<\ldots>_t$ означает усреднение по времени. Выражение (1) есть функция взаимной корреляции двух случайных процессов акустического давления *p(t)* и вектора колебательной скорости $\vec{V}(t)$, при относительном временном сдвиге τ = 0. Акустическое поле считаем стационарным, эргодичным; величины *p(t)* и $\vec{V}(t)$ - центрированными. Сигналы считаем монохроматическими.

Переходя в комплексную плоскость запишем для данной точки поля (в точке расположения приемника) функцию когерентности в декартовой системе координат:

$$\Gamma_{pV_i}(t) = \frac{\left\langle \tilde{p}(t)\tilde{V}_i^*(t)\right\rangle_t}{\sqrt{\left\langle \tilde{p}(t)\tilde{p}_i^*(t)\right\rangle\left\langle \tilde{V}_i(t)\tilde{V}_i^*(t)\right\rangle_t}} = \mathrm{Re}\,\Gamma_{pV_i}(t) + \mathrm{Im}\,\Gamma_{pV_i}(t) \ , \qquad (2)$$

аргумент $\Gamma_{pV_i}(t)$ находим из $\theta(t) = arctg\,\frac{\mathrm{Im}\,\Gamma_{pV_i}(t)}{\mathrm{Re}\,\Gamma_{pV_i}(t)}$, где $\tilde{p}(t)$, $\tilde{V}_i(t)$, $\tilde{V}_i^*(t)$ - аналитические сигналы акустического давления и компонент колебательной скорости на частоте ω, $i = x, y, z$. Функция когерентности принимает значения $-1 \le \Gamma_{pV_i}(t) \le +1$. В случае, если $\Gamma_{pV_i}(t) = \pm 1$ поле величин *p(t)* и $\vec{V}(t)$ является полностью когерентным, при $\Gamma_{pV_i}(t) = 0$ - поле некогерентно; при $-1 < \Gamma_{pV_i}(t) < +1$ поле является частично когерентным. Величины *p(t)* и $\vec{V}(t)\left\{V_x(t), V_y(t), V_z(t)\right\}$ являются случайными функциями времени и координат. В данной работе рассматриваются когерентные свойства мгновенной интенсивности только от

времени с использованием не только величины второго порядка в виде (1) и (2), но и высших порядков.

Время наблюдения T гораздо больше периода T_0 несущей частоты ω $\left(T \gg T_0 = 2\pi/\omega\right)$. Исходя из этого $\vec{I}(t)$ будем считать мгновенной интенсивностью. Когерентность $\Gamma_{pV_i}(t)$ представляет нормированное значение интенсивности $I(t)$ в некоторой полосе частот и является низкочастотной функцией времени с аргументом $\theta(t)$. Рассмотрим два комбинированных приемника расположенных в акустическом поле и разнесенных по горизонтали на расстоянии $d \gg \lambda$. Процесс измерений на всех приемниках синхронизирован. Измеренную интенсивность в точке один обозначим $\vec{I}_1(t)$, в точке два – $\vec{I}_2(t)$. Возникает вопрос, может ли корреляция интенсивностей $\vec{I}_1(t)$ и $\vec{I}_2(t)$ содержать информацию о степени когерентности $p_1(t)$ и $\vec{V}_1(t)$ и $p_2(t)$ и $\vec{V}_2(t)$? Рассмотрим корреляцию интенсивностей $\vec{I}_1(t)$ и $\vec{I}_2(t)$, которые являются статистическими моментами второго порядка. Корреляционную функцию интенсивности запишем в виде:

$$\psi_I(\tau) = \langle I_1(t+\tau) I_2(t) \rangle - \langle I_1(t+\tau \rangle \langle I_2(t) \rangle, \qquad (3)$$

где τ - относительная временная задержка, обусловленная разностью хода длин волн Δl от локального источника до каждого из двух приемников (рис. 1). Таким образом, корреляция интенсивностей $\vec{I}_1(t)$ и $\vec{I}_2(t)$ требует вычисление статистического момента четвертого порядка, что выходит за пределы корреляционной теории второго порядка.

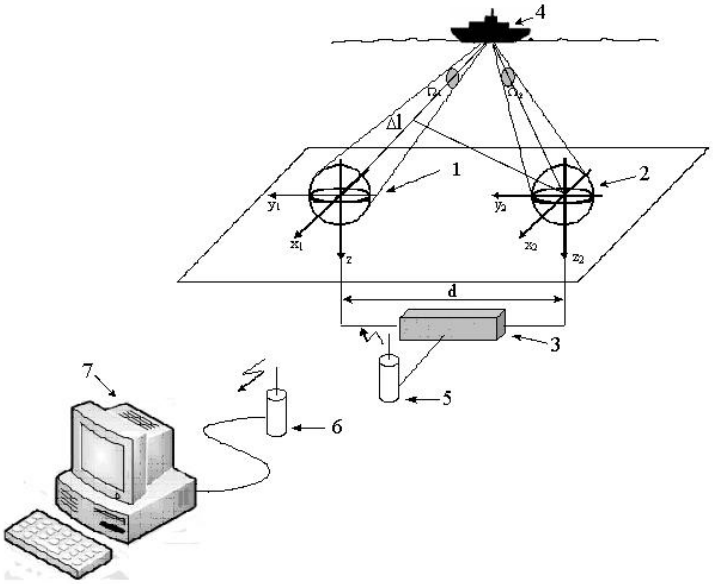


Рис. 1 Схема эксперимента на основе интерферометра интенсивности. Обозначения: 1, 2 – комбинированные приемники; 3 – гермоконтейнер с электронной аппаратурой; 4 – поверхностный источник звука, $\Delta l = \tau \cdot c$ – разность хода длин волн; d = 300 м – расстояние между приемниками (база интерферометра); 5, 6 – приемопередатчики; 7 – многоканальная цифровая система обработки информации.

Входящий в формулу (3) четвертый статистический момент равен сумме попарных произведений вторых моментов [1]:

$$\begin{aligned} &\left\langle p_1(t+\tau) V_1^*(t+\tau) p_2(t) V_2^*(t) \right\rangle = \left\langle p_1(t+\tau) V_1^*(t+\tau) \right\rangle \left\langle p_2(t) V_2^*(t) \right\rangle + \\ &+ \left\langle p_1(t+\tau) p_2(t) \right\rangle \left\langle V_1^*(t+\tau) V_2^*(t) \right\rangle + \left\langle p_1(t+\tau) V_2^*(t) \right\rangle \left\langle V_1^*(t+\tau) p_2(t) \right\rangle = \qquad (4) \\ &= I_1 I_2 + \left| B_{12}(\tau) \right|^2 + \left| \tilde{B}_{12}(\tau) \right|^2, \end{aligned}$$

где $B_{12}(\tau)=\left\langle p_1(t+\tau)V_2^*(t)\right\rangle$ и $\tilde{B}_{12}(\tau)=\langle p_1(t+\tau)p_2(t)\rangle=0$ - первая и вторая корреляционные функции. Третье слагаемое равно нулю, поскольку оно описывает замкнутые потоки энергии (вихри вектора интенсивности) [2]. В результате формула (3) приводится к виду $\psi_1(\tau)=|B_{12}(\tau)|^2=I_1I_2|K_{12}(\tau)|^2$.

Но
$$K_{12}(\tau)=\frac{B_{12}(\tau)}{2\sqrt{I_1I_2}}=|K_{12}(\tau)|e^{i\theta_{12}(\tau)}, \qquad (5)$$

где $K_{12}(\tau)$ - коэффициент корреляции для комплексных амплитуд [3]. В окончательном виде корреляционная функция интенсивности:

$$\psi_I(\tau)=I_1I_2|K_{12}(\tau)|\cos\theta_{12}(\tau) \qquad (6)$$

В выражении (6) I_1, I_2, $K_{12}(\tau)$ - постоянные величины. Если обратиться к рис. 1, то ясно, что при движении источника звука относительно первого и второго приемников интерферометра разность хода Δl и, соответственно, задержка τ будут изменяться, что приведет к модуляции вида $\cos\theta_{12}(\tau)$ корреляционной функции интенсивности $\psi_I(\tau)$.

Для проверки соотношения (6) был проведен натурный эксперимент в мелком море. Приемная система представляла собой интерферометр интенсивности [4], состоящий из двух вертикальных линий, каждая из которых имеет по два комбинированных приемника, (16 цифровых информационных каналов), разнесенных по глубине. Глубина места ~ 30 м. Приемники по горизонтали разнесены на 300 м. Исследовалась когерентность интенсивности, измеряемая двумя комбинированными приемниками, расположенными на глубинах 15 м. Рассматривался ряд частот от 23 Гц до 600 Гц.

На рис. 2 приведена коррелограмма y-компоненты интенсивности для случая проходящего судна. Как и следует из соотношения (6) сигнал постоянного уровня модулирован функцией $\cos\theta_{12}(\tau)$. Для сравнения на рис. 3 представлена $\mathrm{Re}\,\Gamma_{pV_y}(\tau)$ (формула 2) для *y*-компонент интенсивности первого и второго приемников. Из сравнения рис. 2 и 3 следует, что флуктуации $\mathrm{Re}\,I_{y_1}(t)$ и $\mathrm{Re}\,I_{y_2}(t)$ трансформируются в общую картину корреляции интенсивности между точками 1 и 2. Таким образом, статистические свойства *p(t)* и $\vec{V}(t)$ через взаимную корреляцию $\mathrm{Re}\,\vec{I}_1(t)$ и $\mathrm{Re}\,\vec{I}_2(t)$ отражены в корреляционных свойствах $\psi_I(\tau)$. Из рис. 3 следует, что когерентность поля в точке 2 выше, чем в точке 1 на значительной части временного интервала 2400 – 3800 с. Знак минус указывает, что энергия течет в направлении против оси *y*. Колебания уровня интенсивности (рис. 3) (при переводе безразмерных величин в децибелы по мощности) не превышает ±(3 – 5 дБ. Однако, модуляция уровня $\psi_I(\tau)$ достигает ±25 дБ. Таким образом, величина $\psi_I(\tau)$ «откликается» на изменение когерентности поля в более значительной степени, чем интенсивность. На временном интервале 3400 – 3600 с происходит смена знака с «-» на «+» *y*-компонент интенсивностей (рис. 3), т.е. источник звука перемещается из I четверти в III четверть системы координат комбинированных приемников интерферометра. Этот переход не отражается на коррелограмме $\psi_I(\tau)$, что и должно быть, т. к. расположение системы координат не должно влиять на когерентные свойства акустического поля.

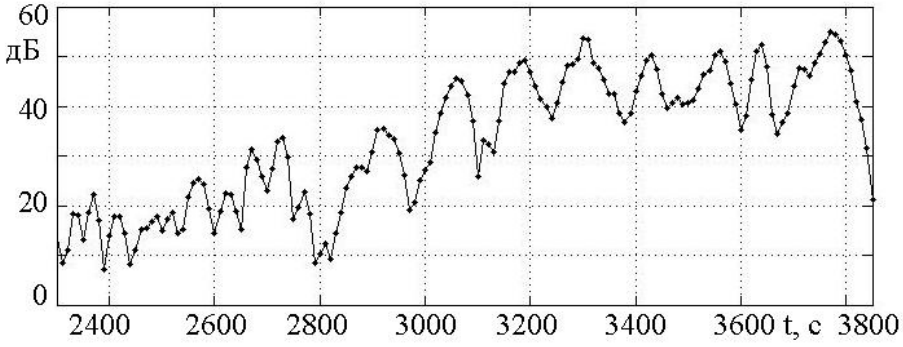


Рис. 2. Компонента *y* коррелограммы интенсивности проходящего судна. Частота – 166 Гц, полоса частот – 6 Гц. Время усреднения – 20 с. Шкала децибел выбрана произвольно.

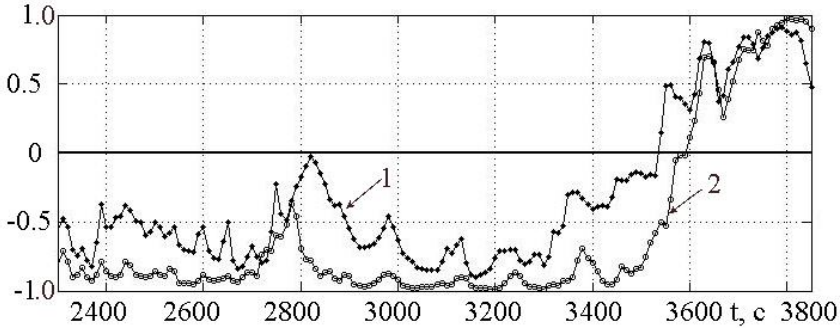


Рис. 3. Зависимость от времени *y*-компонент интенсивностей $\mathrm{Re}\, I_{y_1}(t)$ и $\mathrm{Re}\, I_{y_2}(t)$ от проходящего судна в приемных точках интерферометра разнесенных на расстояние 300 м. Частота – 166 Гц, полоса частот – 6 Гц. Время усреднения – 3 с.

Данная работа демонстрирует: исследование сложных акустических процессов и выяснение степени их когерентности с использованием четвертого статистического момента вектора интенсивности открывает совершенно новую, ранее неизвестную, информацию об акустическом поле шума и сигнала, что дает новый импульс в развитии теории частичной и полной когерентности в векторной акустике. Очевидно, что данный подход может найти применение при решении прикладных задач.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М. 1957. 501 с.

2. *Щуров В.А., Кулешов В.П., Черкасов А.В.* Вихревые свойства вектора акустической интенсивности в мелком море. // Акуст. журн. 2011. Т.57, №6. С. 837-843.

3. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М. 1976. 494 с.

4. В.А. Щуров, С.Г. Щеглов*, В.П. Кулешов, Е.Н. Иванов*, Е.С. Ткаченко Гидроакустический комбинированный интерферометр интенсивности// XXVI Сессия РАО, совмещенная с XIV школой-семинаром им. акад. Л.М.Бреховских "Акустика океана". 2013. С. 335–338.

О НЕЛИНЕЙНОМ ЗАТУХАНИИ ТОНАЛЬНЫХ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДАЛЬНЕМ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ОКЕАНЕ

Н.И. Дюльдина

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Россия, 690041 Владивосток, ул. Балтийская, д.43Тел. (4232)37-49-13
E-mail: duldina32@mail.ru

Физический механизм аномального затухания низкочастотного звука в воде до сих пор не выяснен. Анализ результатов натурных исследований, выполненных под руководством Акуличева В.А., показывает, что при одновременном излучении тональных сигналов двух кратных частот звук низкой частоты затухает сильнее. Этот эффект имеет амплитудную зависимость и наиболее ярко проявляется при приеме сигналов вблизи оси подводного звукового канала, где интенсивность сигналов значительно выше, чем на других глубинах. Именно амплитудная зависимость наблюдаемого явления позволяет сделать вывод о том, что энергия сигнала низкой частоты «перекачивается» в кратную гармонику за счет нелинейности.

Уменьшение с расстоянием звуковой энергии в океане обусловлено затуханием и геометрическим расхождением фронта волны (с учетом релаксации). Обобщенное понятие затухания звука включает в себя поглощение звука, т.е. переход энергии волны в тепло, рассеяние звука на неоднородностях морской среды и дна и, возможно, другие потери энергии, причины которых не всегда ясны. История измерения частотных коэффициентов поглощения и изучения физических механизмов, ответственных за затухание звука в океане, изложена, например, Вадовым Р.А. [1]. Начиная с 40-ых годов проводилось последовательное снижение исследуемых частот, однако причины аномально повышенного затухания звука низких частот (меньших 3-5 кГц) до сих пор неочевидны.

На сегодняшний день выяснена связь низкочастотного поглощения с температурой, соленостью и водородным показателем pH среды. Использование релаксационной теории и рассмотрение не только сдвиговой, но и объемной («второй») вязкости позволило достаточно точно оценить обобщенные экспериментальные данные частотной зависимости коэффициента затухания для различных районов Мирового океана. В предположении существенной низкочастотной релаксации солей бора Франсуа и Гаррисон [2], Вадов [1] и др. предложили эмпирические формулы, учитывающие также механизм структурной релаксации воды и релаксацию сернокислого магния на высоких частотах. Точность оценок экспериментальных данных значениями коэффициентов поглощения, рассчитанными по этим формулам, не во всех регионах удовлетворительна. Надежных данных, подтверждающих существенную роль низкочастотной релаксации солей бора, получено не было. Более того, Браунинг, Торп и Меллен показали, что и в пресной воде также было обнаружено аномальное низкочастотное затухание при использовании взрывных источников звука [3].

Наряду с исследованием «линейного» затухания звука в 60-70 г и позже обсуждалась возможность добавочного затухания звука из-за нелинейных процессов, в основном для взрывных источников. Результаты наблюдений в области низких частот имеют сильный разброс, а иногда и противоречат друг другу. Петухов и Фридман убедительно [4] доказывают, что спектр реального взрывного сигнала имеет максимум, зависящий от величины заряда, поэтому нелинейная перекачка энергии может идти вверх и вниз по спектру. Частотная зависимость коэффициентов затухания и их значения, в таком случае, определяются величиной заряда и положением спектрального максимума. Вывод о влиянии нелинейных эффектов авторы подтверждают ссылкой на натурные данные о меньшем затухании слабых тональных сигналов по сравнению с соответствующими частотными компонентами мощного акустического сигнала от взрывного источника [5] .

В экспериментах по дальнему распространению звука в океане, проводимых с использованием мощных тональных и импульсных излучателей нелинейные искажения могут накапливаться вдоль трасс. Вопрос об условиях проявления и величине нелинейных искажений при распространении волн конечной амплитуды обсуждался Наугольных и Островским [6]. Для волн с цилиндрическим расхождением волнового фронта (распространение в канале) амплитуда второй гармоники нарастает пропорционально корню квадратному из пройденного расстояния:

$$\nu_2=\nu_0(r_0/r)^{1/2}\left|(r_0/r)^{1/2}-1\right|\sigma_0, \qquad (1)$$

$$\sigma_0=\varepsilon M/kr$$

ν_0-амплитуда волны в точке r_0. Нелинейные искажения накапливаются в области, где они превосходят диссипативные эффекты, т.е. число Рейнольдса $Re=(2\varepsilon p/b\omega)>1$, b- эффективный коэффициент вязкости.

Анализ данных, полученных в эксперименте, проведенном в северо-западной части Тихого океана под руководством Акуличева В.А. [7] позволяет сделать вывод о существенном влиянии нелинейных механизмов на затухание тональных акустических сигналов. Ранее [8] уже обсуждались обнаруженные автором расхождения экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. В настоящей статье рассматриваются дополнительные факты, подтверждающие предположение о нелинейном затухании звука. Напомним схему эксперимента.

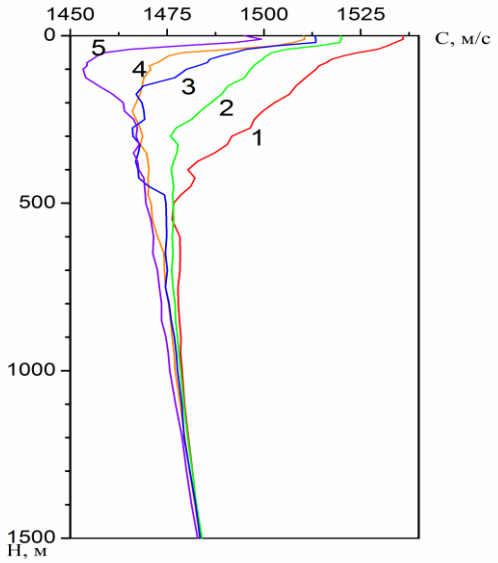


Рис1.Вертикальные профили скорости звука в начальной точке-1,на расстоянии 400км-2, 735км- 3, 810км- 4, 1010км-5.

Звуковые сигналы с кратными частотами 232 и 696 Гц излучались одновременно на глубине 100м при буксировке излучателя вдоль трассы, пересекающей зону субарктического фронта. Приемная система с тремя одиночными гидрофонами располагалась в области субтропических вод в начале трассы. Горизонты приема сигналов 60, 650 и 1000м. Излучающее судно удалялось от приемника вдоль трассы в область вод субтропической структуры. Гидрологические параметры и, соответственно, поле скорости звука, значительно изменялись вдоль трассы. Вертикальные профили скорости звука c(z) в точке приема в начале трассы и на разных расстояниях от приемника представлены на рис. 1.

В начале трассы мощный подводный звуковой канал (ПЗК) охватывает всю толщу вод, ось канала расположена на глубине примерно 600м. В конце трассы ось ПЗК поднимается на глубину около 100м, значение скорости звука на оси канала изменяется с 1475м/с до 1450м/с, т.е. понижается на 25 м/с. Отметим, что значение скорости звука на горизонте излучения 100м изменяется более, чем на 60м/с - от 1520 м/с в начале трассы до 1455м/с в конце. Таким образом, в начале трассы в толще океана распространяются лучи с

углами выхода из источника от 15^0 до -15^0. По мере снижения скорости звук на глубине излучения в толще вод распространяется все большее количество лучей. В конце трассы, когда источник располагается вблизи оси ПЗК, в толщу вод захватываются лучи с углами выхода от 22^0 до -22^0. «Дополнительные» лучи распространяются вблизи оси ПЗК, что приводит к постепенному увеличению интенсивности сигналов, принятых на глубинах с минимальными значениями скорости звука (650 и 1000м). Изменение уровня сигналов, принятых в фиксированной точке, обусловленное нестационарностью звукового поля, в экспериментах по определению коэффициентов затухания принято считать систематической ошибкой, не имеющей частотной зависимости. Рассмотрим вариации интенсивности принятых сигналов в зависимости от расстояния до движущегося источника.

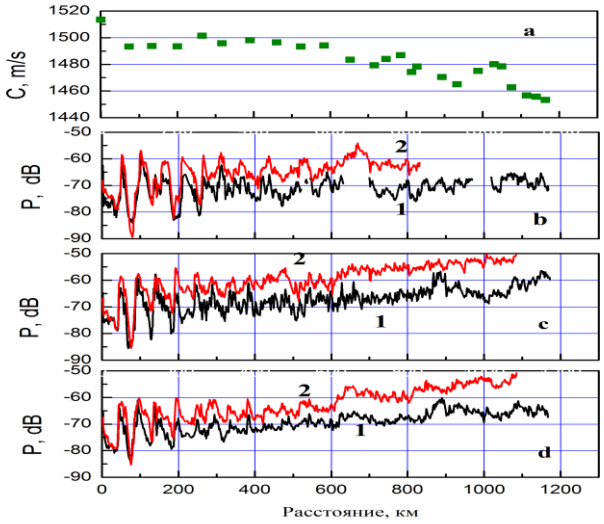


Рис. 2. Значения скорости звука на глубине 100 м- a; зависимость изменения уровня сигналов с частотами 232 (1) и 696Гц (2) от расстояния до источника (скорректированы на величину цилиндрического расхождения фронта в зависимости от расстояния (10*log(r)) и поглощение αr). Глубина приема сигналов: b-100м; c-650м; d-1000 м

На рис. 2, а представлены значения скорости звука на горизонте излучения вдоль трассы. Уровни акустических сигналов с частотами 232 Гц (1) и 696 Гц (2), принятых на глубинах 100, 650 и 1000м, изображены на рис. 2.b, 2.c b и 2.d соответственно. Уровни сигналов были предварительно скорректированы на величину цилиндрического расхождения фронта в зависимости от расстояния (10*log(r)) и поглощение αr. Значения коэффициентов поглощения рассчитанные по формулам Франсуа и Гаррисона при pH=8 для частот 232Гц и 696 Гц α равны $4{,}5*10^{-3}$ дБ/км и$3{,}0*10^{-2}$ дБ/км. На всех горизонтах уровень сигналов высокой частоты превышает уровень сигналов низкой частоты. Накапливающаяся с увеличением расстояния разность уровней сигналов позволяет сделать вывод о нелинейном эффекте «перекачки» энергии сигнала нижней частоты в кратную гармонику. Проявляется амплитудная зависимость наблюдаемого явления, что характерно для нелинейных механизмов взаимодействия волн. Разности усредненных по расстоянию (интервал усреднения примерно 70 км) уровней сигналов для различных глубин приема показаны на рис.3. Сравнение результатов, показанных на рис.3, подтверждает амплитудную зависимость эффекта.

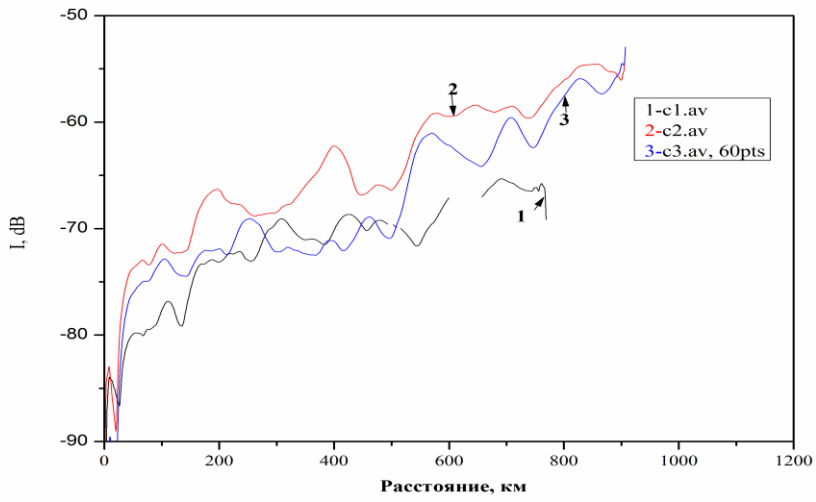


Рис.3. Разности усредненных по расстоянию уровней сигналов с частотами 232 и 696 Гц, принятых на глубинах 1- 100м, 2-650м, 3-1000м.

Максимальная разность уровней наблюдается на глубине приема 650 м, на оси канала, минимальная – на 100м, где интенсивность звукового поля меньше всего.

Таким образом, анализ экспериментальных результатов показывает, что при дальнем распространении тонального звука накапливаются нелинейные искажения, приводящие к «перекачке» энергии сигнала нижней частоты в кратную (третью) гармонику. Величина перераспределения энергии зависит от расстояния и от интенсивности сигналов. Разность между уровнями сигналов может превышать 20 дБ, что сравнимо с уровнем сигнала низкой частоты вблизи источника.

Литература

1. Вадов Р.А. Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде// Акустический журнал, 2000, Т.46, №5, С.624-631.
2. Francois R.T., Garrison G.R. Sound absorption measurement.,Pt.2:Boric acid contribution and equation for total absorption- JASA, (1982) V.72, no.6, P. 1879-1889.
3. *Brauning D.G., Torp W.H.,Mellen P.N. Attenuation of low-friquency sound in* fresh water.- 6th International Congress on Acoustics,(1986) Tokyo.
4. Lovett J.R. Northeastern Pacific sound attenuation using low-frequency cw - sources.- J. Acoust. Soc. America, (1975),v.58, no.3, pp.620-625.
5. Петухов Ю.В., Фридман В.Е. «Нелинейный механизм аномального затухания гидроакустических сигналов»// Акустический журнал, 1980, т. 26, с. 924-926
6. Наугольных К.А., Островский Л.А. О нелинейных эффектах в акустике океана.//Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука- 1982. -С.181-196.
7. 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 г., т.1, 401 с.
8. Дюльдина Н.И. О влиянии крупномасштабных неоднородностей океана на распространение низкочастотного звука//Сборник трудов 12 сессии РАО, т.2,-М.:ГЕОС, 2010,с.187-191.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КУМУЛЯНТНЫХ ФУНКЦИЙ 3-ГО ПОРЯДКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ

С.В. Горовой

Дальневосточный федеральный университет.
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, тел /факс: (423) 2450982,
e-mail: GorovoySV@mail.ru

Целью работы является исследование кумулянтных функций гидроакустических шумов с целью уточнения условий, при которых их можно считать стационарными эргодическими гауссовыми. Приведены результаты экспериментального исследования кумулянтных функций 3-го порядка гидроакустических шумов в Заливе Петра Великого Японского моря применительно к задачам обработки сигналов, указаны наблюдаемые на практике временные интервалы их изменчивости. Несмотря на то, что даже в тех случаях, когда проверка непротиворечия одномерной и двумерной плотностей распределения гауссову закону согласно критерию χ^2 при уровне значимости 0.05 дает положительный результат, могут наблюдаться значительные вариации кумулянтных функций 3-го порядка и по времени и по уровню, что необходимо учитывать при разработке алгоритмов обработки гидроакустических сигналов.

Для описания свойств нестационарных случайных процессов, к которым можно отнести гидроакустические шумы в районах интенсивного судоходства, используются понятия кратковременной и долговременной стационарности, времени стационарности, времени эргодичности как всего процесса в целом, так и его отдельных характеристик [1].

Предположения о стационарности и эргодичности помехи используются при построении многих алгоритмов обработки сигналов. Знание особенностей статистической структуры гидроакустических шумов в заданном районе позволяет глубже понять физику их происхождения и сформировать их уточненную модель, применимую в этом районе по крайней мере в течении некоторого интервала времени. Эта модель может быть использована для разработки адаптивных и эвристических алгоритмов обнаружения и оценивания параметров гидроакустических сигналов на интервалах времени, в течении которых ее можно считать применимой. На этих интервалах времени такие алгоритмы будут обеспечить лучшие характеристики обнаружения и оценивания параметров сигналов, чем алгоритмы, использующие эргодическую гипотезу и усредненные свойства помех.

В гидроакустических системах для построения адаптивных и эвристических алгоритмов обработки сигналов на частотах выше 3 кГц могут быть полезны уточненные модели помех, адекватные экспериментальным данным на интервалах времени начиная с нескольких десятков миллисекунд.

В работах [2, 3] приведены некоторые результаты экспериментального исследования оценок одномерных, двумерных и трехмерных плотностей распределения вероятностей выборочных значений давления гидроакустических шумов в заливе Петра Великого Японского моря, который относится к районам интенсивного судоходства. Прием производился одиночным ненаправленным гидрофоном, расположенным вблизи дна в прибрежных водах на глубине 20 м, частота квантования f_s составляла 44,1 кГц, перед проведением анализа исследуемый сигнал был пронормирован по уровню так, чтобы его среднее значение m и среднеквадратическое отклонение от среднего s стали равными 0 и 1 соответственно.

В [2] и [3] отмечается, что для исследованных сигналов проверка непротиворечия оценок одномерного и двумерного распределений вероятностей выборочных значений

звукового давления гауссову закону согласно критерию χ^2 при уровне значимости 0.05 не дала устойчивых положительных результатов.

В настоящей работе приведены результаты оценивания кумулянтных функций (КФ) 3-го порядка в диапазоне частот Δf = 4-5 кГц тех фрагментов исследованных в [3] сигналов, для которых проверка непротиворечия оценок одномерного и двумерного распределений вероятностей выборочных значений звукового давления гауссову закону согласно критерию χ^2 при уровне значимости 0.05 дала положительные результаты.

Согласно [4, 5] для гауссовых случайных процессов КФ 3-го и более высоких порядков равны нулю., в то время как для негауссовых случайных процессов КФ 3-го и более высоких порядков в общем случае отличны от нуля. Это может быть использовано для оценки отличий от гауссовости, а также для получения информации о «внутренней структуре» случайных процессов. Нормированная КФ 2-го порядка (взаимная корреляционная функция) совместно стационарных и эргодических случайных процессов *x(t)* и *y(t)*

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) y(t-\tau) dt \qquad (1)$$

характеризует статистическую связь 1-го порядка между ними. Нормированная КФ 3-го порядка совместно стационарных в узком смысле и эргодических случайных процессов $x(t)$, $y(t)$ и $z(t)$ определяется соотношением

$$R_{xyz}(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) y(t-\tau_1) z(t-\tau_2) dt, \qquad (2)$$

где σ_x, σ_y, σ_z - среднеквадратические отклонения случайных процессов $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Она характеризует степень статистической связи 2-го порядка [5] между случайными процессами $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$. Если $x(t) = y(t) = z(t)$, соотношение (2) преобразуется в

$$R_{xxx}(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{\sigma_x^{\,3}} \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) dt. \qquad (3)$$

В данном случае $R_{xxx}(\tau_1, \tau_2)$ характеризует степень статистической связи между значениями случайного процесса в произвольный момент времени t и значениями этого же случайного процесса в моменты времени $t \pm \tau_1$ и $t \pm \tau_2$.

Если $x(t) = y(t) = z(t)$ и $\tau_1 = \tau_2 = \tau$, соотношение (2) преобразуется в

$$R_{xx^2}(\tau) = \frac{1}{\sigma_x^{\,3}} \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) x(t-\tau)^2 dt. \qquad (4)$$

В данном случае $R_{xx^2}(\tau)$ характеризует степень статистической связи 1-го порядка между значением случайного процесса в произвольный момент времени t и квадратом значения этого же случайного процесса в моменты времени $t \pm \tau$. Аналогично вводятся кумулянтные функции более высоких порядков.

Численное оценивание многомерных КФ сопряжено с рядом трудностей [5]. Предположения о стационарности, эргодичности и гауссовости шумов моря в районах интенсивного судоходства на интервалах времени, превышающих несколько минут не соответствуют результатам наблюдений. Поэтому результаты применения соотношений (1-3) при ограниченном времени интегрирования *T* следует рассматривать как очень грубые оценки. При уменьшении величины *T* в (1-3) появляется возможность исследования временнóй изменчивости оценок КФ, но ухудшается статистическая устойчивость получаемых результатов.

На рис. 1 показана оценка начального участка корреляционной функции $R_{xx}(\tau)$ фрагмента исследуемого сигнала, на рис. 2 – оценка начального участка КФ $R_{xx^2}(\tau)$ того же фрагмента исследуемого сигнала, что и на рис. 1, на рис. 3 показана оценка начального

участка КФ $R_{xxx}(\tau_1,\tau_2)$ того же фрагмента исследуемого сигнала, что и на рис. 1 (вид сверху на сектор поверхности, описываемой функцией $R_{xxx}(\tau_1,\tau_2)$, соответствующий значениям $\tau_1 > 0$, $\tau_2 \le \tau_1$, сектора, соответствующие остальным значениям τ_1 и τ_2 представляют собой зеркальные отображения данного относительно линий $\tau_1 = 0$, $\tau_2 = \tau_1$, $\tau_1 = \tau_2$, $\tau_1 = -\tau_2$). На рис. 4 показана аналогичная оценка начального участка КФ $R_{xxx}(\tau_1,\tau_2)$ для фрагмента исследуемого сигнала, отстоящего от данного на 20 мс. Расчеты производились по формулам (1), (3), (4) с заменой непрерывных параметров t, τ, τ_1 и τ_2 их выборочными значениями через интервалы $\Delta t = 1/f_s$, интегралов - суммами, среднеквадратического отклонения σ_x– его оценкой s_x. Время усреднения T составляло 0.5 сек (22050 выборочных значений). На рис. 1 - рис. 4 приведены графики для интервала времени 20 мс, что составляет 4% от времени усреднения T.

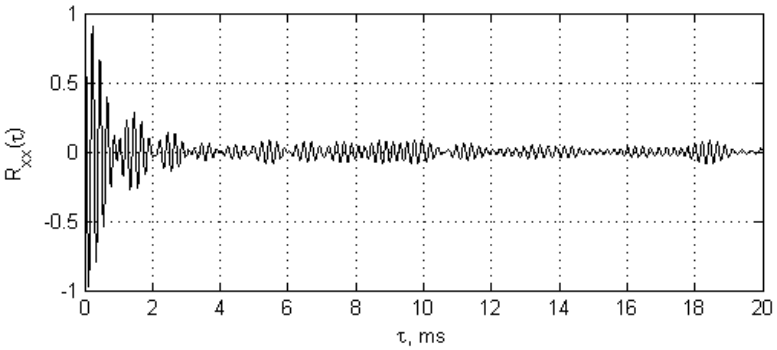


Рис. 1. Оценка начального участка КФ $R_{xx}(\tau)$ фрагмента исследуемого сигнала

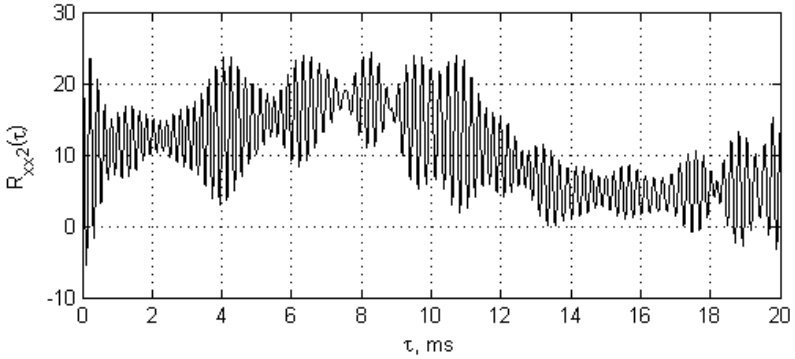


Рис. 2. Оценка начального участка КФ $R_{xx^2}(\tau)$
того же фрагмента исследуемого сигнала, что и на рис. 1

Из рис. 1 видно, что на данном интервале корреляционная функция затухает со временем, ее огибающая имеет экстремумы в районах 1.5 мс, 2.5 мс, 3.5 мс, 4.5 мс, 5.5 мс и т.д., заметно возрастание корреляции вблизи 10 мс. Оценки начальных участков корреляционной функции $R_{xx}(\tau)$ для подавляющего большинства других фрагментов исследованного сигнала внешне мало отличаются от данного. Поэтому по отношению к $R_{xx}(\tau)$ исследованный сигнал можно считать стационарным эргодическим.

Из рис. 2 видно, что КФ $R_{xx^2}(\tau)$ затухает со временем значительно слабее, чем $R_{xx}(\tau)$, усиление статистической связи вблизи 10 мс более заметно, чем у $R_{xx}(\tau)$. Оценки начальных участков КФ $R_{xx^2}(\tau)$ фрагментов исследованного сигнала, сдвинутых относительно друг друга более чем на 10 мс за редкими исключениями внешне весьма заметно отличаются друг от друга. Для гауссова случайного процесса КФ $R_{xx^2}(\tau)$ должна быть равна нулю, что в данном случае не наблюдается. Это свидетельствует о том, что по отношению к оценкам КФ $R_{xx^2}(\tau)$ (характеризующей степень статистической связи 1-го порядка между значением случайного процесса в произвольный момент времени t и квадратом значения этого же

случайного процесса в моменты времени $t \pm \tau$) на интервалах времени порядка единиц секунд исследованный сигнал нельзя считать стационарным эргодическим, статистические связи между значениями *x(t)* и $x^2(t+\tau)$ существенно изменяются при смещениях *t* более, чем на 10 мс, совместное распределение *x(t)* и $x^2(t+\tau)$ не описывается гауссовым законом.

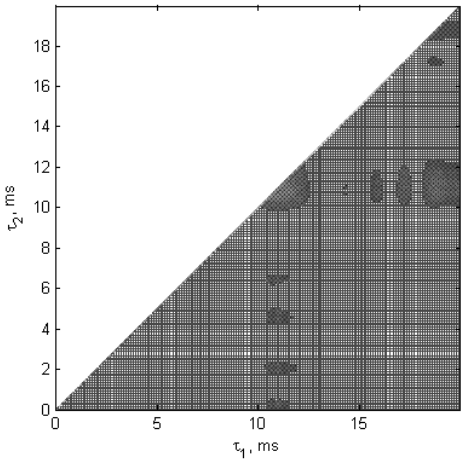


Рис. 3. Оценка начального участка (вид сверху) 3-мерной КФ $R_{xxx}(\tau_1,\tau_2)$ того же фрагмента исследуемого сигнала, что и на рис. 1

Для гауссовых случайных процессов КФ $R_{xxx}(\tau_1,\tau_2)$ должна быть равна нулю. На рис. 3 и рис. 4 заметны экстремумы $R_{xxx}(\tau_1,\tau_2)$ при значениях τ_1 и τ_2 , соответствующих экстремумам $R_{xx^2}(\tau)$. Особенно заметным является экстремум при $\tau_1 = \tau_2 = 10$ мс.

Анализ показанных на рис. 3 и рис. 4 оценок КФ $R_{xxx}(\tau_1,\tau_2)$ свидетельствует о том, что совместное распределение *x(t)* $x(t+\tau_1)$ и $x(t+\tau_2)$ при времени накопления порядка нескольких секунд не описывается гауссовым законом.

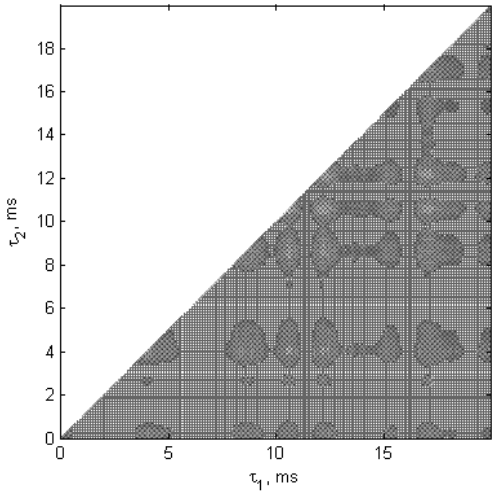


Рис. 4. Оценка начального участка (вид сверху) 3-мерной КФ $R_{xxx}(\tau_1,\tau_2)$ фрагмента исследуемого сигнала с «более существенными» отклонениями от гауссовости, чем на рис. 3

Учитывая значительную изменчивость и явно выраженную нестационарность исследованных фрагментов записей гидроакустических шумов, представленные в данной работе результаты характеризуют лишь экспериментальные данные, на основе которых они были получены, но могут быть использованы в качестве ориентировочных при проведении дальнейших исследований.

Литература

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М: Мир, 1989. – 540 с.

2. Горовой С. В. Некоторые результаты экспериментального исследования двумерных функций распределения давления гидроакустических шумов в прибрежных водах Залива Петра Великого Японского моря. Материалы докладов VII всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток, Дальнаука, 2011. С 444-447.

3. Горовой С.В. Некоторые результаты экспериментального оценивания трехмерных плотностей распределения выборочных значений давления гидроакустических шумов в Заливе Петра Великого Японского моря. Материалы докладов VIII всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток, Дальнаука, 2013 в печати.

4. Малахов А.Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. – М.: Сов. Радио, 1978.-376 с.

5. Новиков А.К. Полиспектральный анализ. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2002. - 180 .

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ГРАНИЧНОЙ ЗАДАЧИ ПЕКЕРИСА

Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина

ИПМТ ДВО РАН
690950, Владивосток, ул. Суханова 5а
тел.: (423) 243-26-44, факс: (423) 243-24-16, e-mail: zlobina@marine.febras.ru

Представлен анализ трех принципиально различных решений граничной задачи Пекериса. Первое решение, классическое, построенное в классе аналитических функций, соответствует самосопряженной модельной постановке. В этом решении поток мощности через границу раздела равен нулю. Его основной недостаток связан с сингулярностью решения на оси симметрии и в волноводе, и в полупространстве. Второе решение построено в классе функций, представимых интегралом Фурье-Бесселя. В этом решении жидкий слой играет роль нагруженного на полупространство резонатора, в котором горизонтальный поток мощности равен нулю. Третье решение, соответствующее несамосопряженной модельной постановке граничной задачи, является обобщенным. Оно описывает режим бегущей волны в волноводе и коридорах вытекания в полупространстве и режим стоячей волны в ближней зоне. Решение является регулярным везде, за исключением источника, удовлетворяет условиям излучения и условиям непрерывности «в среднем».

В докладе рассматривается звуковое поле в волноводе Пекериса, создаваемое точечным источником. Решением такой граничной задачи являются функции, допускающие представление в виде интеграла Фурье - Бесселя или интеграла Ганкеля:

$$\begin{aligned} \varphi_1(r,z) &= \int_0^\infty \tilde{\varphi}_1(\xi,z) J_0(\xi r)\xi d\xi = \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\varphi}_1(\xi,z) H_0^{(2)}(\xi r)\xi d\xi, \qquad z\in(0,h), \\ \varphi_2(r,z) &= \int_0^\infty \tilde{\varphi}_2(\xi,z) J_0(\xi r)\xi d\xi = \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\varphi}_2(\xi,z) H_0^{(2)}(\xi r)\xi d\xi, \qquad z\in(h,\infty), \end{aligned} \tag{1}$$

где ξ - произвольный комплексный спектральный параметр, $\tilde{\varphi}_{1,2}(\xi, z)$ - решение граничной задачи для поперечного оператора.

Если в (1) определить вертикальное волновое число в полупространстве k_{32} как аналитическую функцию спектрального параметра на плоскости комплексного переменного ξ с разрезом EJP ($\operatorname{Im} k_{32} = 0$), то полученное решение также будет аналитической функцией спектрального параметра. Это решение было впервые предложенное Л.М. Бреховских в работе [1] и является самосопряженным (SC) модельным решением, в котором поток мощности через границу раздела равен нулю. На частотах, больших первой критической, решение является сингулярным на всей оси симметрии и в волноводе, и в полупространстве, что указывает на появление там мнимых источников. Физически сингулярность решения связана с тем, что в самосопряженной модельной постановке отсутствует поток мощности через границу раздела. По этой причине излучаемые источником сферические волны, многократно отраженные границами волновода, суммируются на оси симметрии синфазно, образуя расходящийся ряд амплитудных значений с логарифмической особенностью в нуле.

Решение той же задачи, предложенное Пекерисом в работе [2] с использованием разреза $\operatorname{Re}\xi = k_2$, решение, предложенное в работе [3] с использованием разреза $\operatorname{Re} k_{32}^2 = 0$, и решение, рассмотренное в работе [4] с использованием разреза $\operatorname{Re} k_{32} = 0$, построены с участием комплексных собственных функций несамосопряженного оператора и соответствуют несамосопряженной модельной постановке исходной граничной задачи. В таких решениях поток мощности через границу раздела является положительно определенным, однако ни одно из них не является корректным в заявленной области

определения. Причина заключается в том, что любое из этих решений содержит собственные функции комплексного спектра, амплитуда которых экспоненциально растет в полупространстве.

Впервые несамосопряженная модельная постановка задачи Пекериса, позволяющая получить корректное решение во всей заявленной области определения, была сформулирована в работе [5], а в работах [6] выполнен подробный анализ обобщенного решения, соответствующего несамосопряженной модельной постановке. Характерная особенность несамосопряженного (NSC) обобщенного решения заключается в том, что звуковое поле описывается собственными функциями двух сопряженных операторов, с одним из которых связаны расходящиеся волны, а с другим сходящиеся волны отдачи. По этой причине локальные условия непрерывности поля нарушаются на горизонтах полного внутреннего отражения и на горизонте источника, но выполняются «в среднем», если масштаб усреднения соизмерим с длиной волны.

Смешанная модельная постановка рассмотрена в работе [7] при решении более простой задачи на отражение сферической волны от границы раздела двух сред. Там же дан численный анализ поля вектора интенсивности, создаваемого точечным источником вблизи границы раздела двух сред. При углах падения, меньших критического, модельная постановка предполагает утечку энергии через границу раздела и в этом смысле она является несамосопряженной. При углах падения, больших критического, утечка энергии прекращается, вертикальная компонента вектора интенсивности на границе раздела равна нулю «в среднем», и в этом смысле модельная постановка является самосопряженной. В таком модельном описании отражение не является полным, внутренним отражением, т.к. горизонтальная компонента вектора интенсивности остается непрерывной с весом на границе раздела. В самом решении присутствуют только расходящиеся волны.

Примером решения в смешанной модельной постановке (MIX) является решение задачи Пекериса в классе функций, представимых интегралом Фурье-Бесселя. Такое решение, являясь регулярным (ограниченным) во всей области определения, за исключением источника, прекрасно описывает утечку энергии при углах падения, меньших критического значения, и полное отражение по вертикальной компоненте вектора интенсивности при углах падения, больших критического. Однако оно удовлетворяет условиям излучения только в полупространстве, а не в жидком слое, который играет в этом модельном решении роль резонатора, нагруженного на полупространство, а не волновода. Горизонтальный поток мощности в таком резонаторе равен нулю, а решение в резонаторе удовлетворяет условию погашаемости на бесконечности, но не условиям излучения.

Структура звукового поля в волноводе Пекериса, соответствующая трем модельным решениям, показана на рис. 1, 2, 3. Параметры нижнего полупространства соответствуют морскому дну песчаного типа: $\rho_{12} = 1/1.6$, $c_{12} = 1.5/1.75$, $z_1 = z/h$, $r_1 = r/h$, горизонт источника – приповерхностный, $z_{01} = z_0/h = 0.1$, частотный параметр $k_1 h = 50$ соответствует восьми распространяющимся нормальным волнам. На рисунках отчетливо проявляются все характерные особенности сравниваемых решений. Интегральное представление Фурье-Бесселя (1) описывает режим стоячей волны, в отличие от классического решения Л.М. Бреховских, которое соответствует режиму бегущей волны.

Структура стоячей волны для решения, соответствующего смешанной модельной постановке, особенно хорошо выражена при одномодовом режиме, показанном на рис. 4, *а*. Для сравнения на рис. 4, *б* приведен расчет звукового поля, соответствующего самосопряженной модельной постановке. Описание полей становится тождественным на докритических частотах (рис. 5).

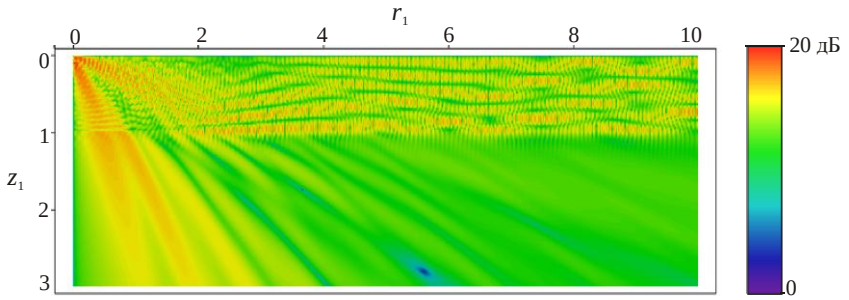


Рис. 1. Звуковое поле точечного источника, соответствующее смешанной модельной постановке, $k_1 h = 50;\ z_{01} = z_0 / h = 0{,}1$.

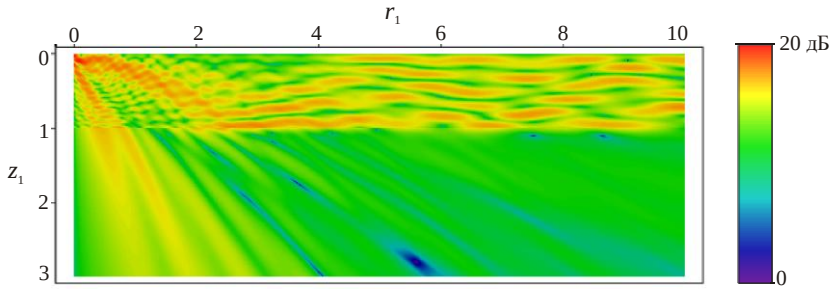


Рис. 2. Звуковое поле точечного источника, соответствующее самосопряженной модельной постановке, $k_1 h = 50;\ z_{01} = 0{,}1$.

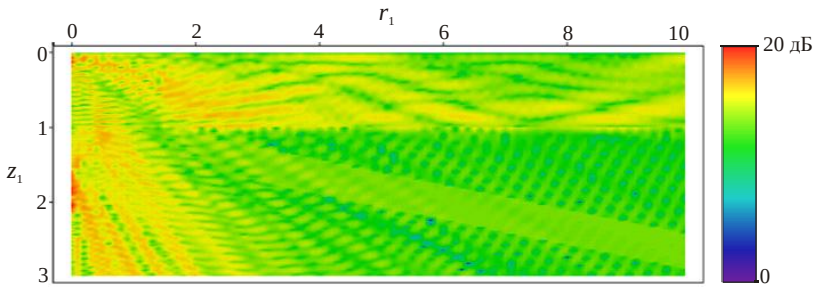


Рис. 3. Звуковое поле точечного источника, соответствующее несамосопряженной модельной постановке, $k_1 h = 50;\ z_{01} = 0{,}1$.

Однако, для обобщенного решения и на докритических частотах (рис. 6, *б*) проявляются все характерные особенности решения в полупространстве: зона фокусировки, каустика, коридоры вытекания нормальных волн, подробно исследованные в работе [6]. Кроме того, на частотах, меньших первой критической, в обобщенном решении присутствует медленная обобщенная волна, соответствующая комплексному угловому спектру источника. Ее вклад в суммарное поле становится доминирующим, если источник расположен вблизи границы раздела, как это показано на рис. 6, *а*. Эта волна является аналогом хорошо известных волн пограничного типа, таких как волны Рэлея, Шолте, Стоннели. Однако она возбуждается на границе раздела двух жидких сред комплексным угловым спектром источника. Все особенности обобщенного решения хорошо подтверждаются экспериментом.

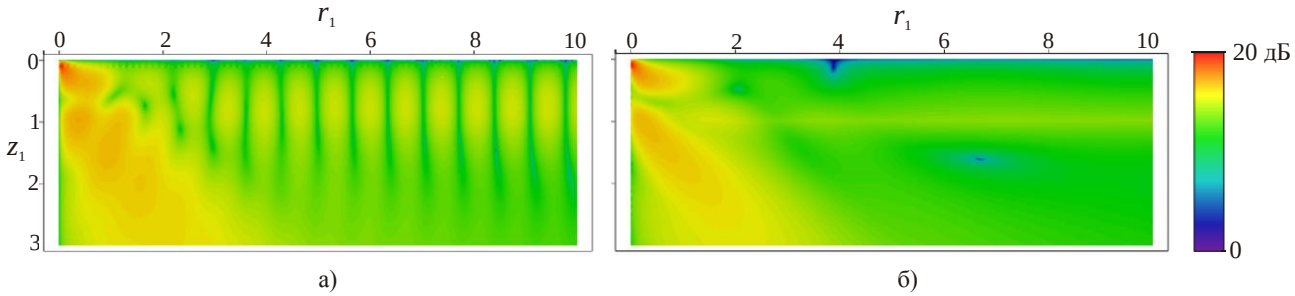


Рис. 4. Звуковое поле точечного источника, соответствующее смешанной модельной постановке (а) и в самосопряженной модельной постановке (б), $k_1 h = 5;\ z_{01} = 0{,}1$.

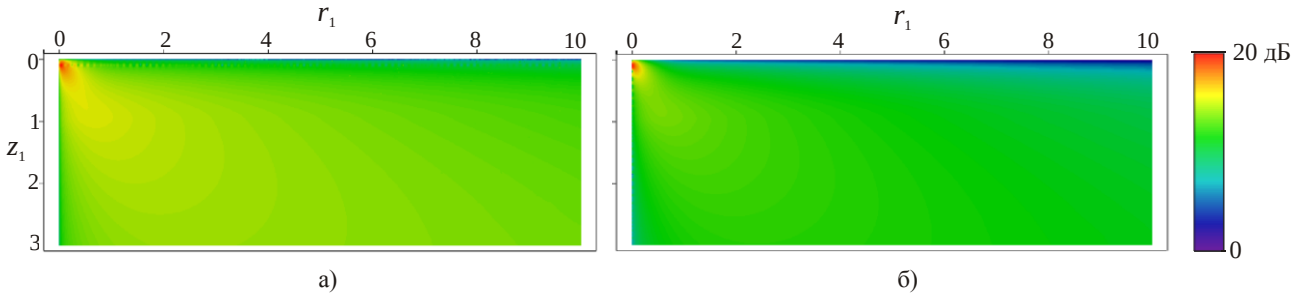


Рис. 5. Звуковое поле точечного источника, соответствующее смешанной модельной постановке (а) и в самосопряженной модельной постановке (б), $k_1 h = 2{,}5;\ z_{01} = 0{,}1$.

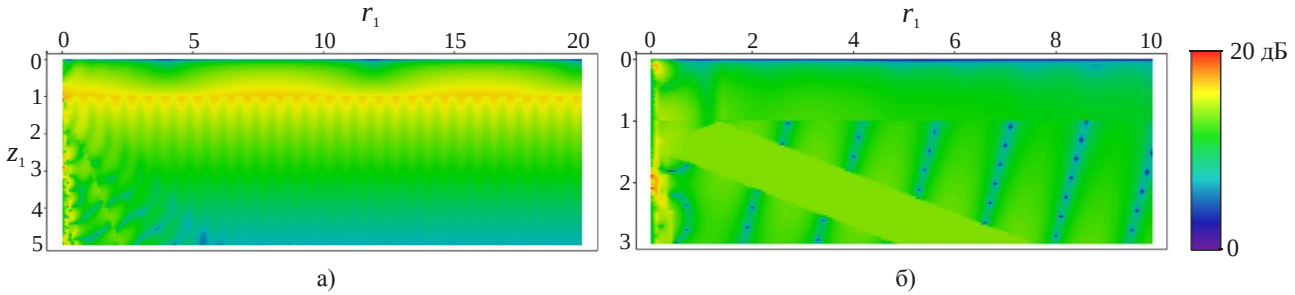


Рис. 6. Звуковое поле точечного источника, соответствующее несамосопряженной модельной постановке: а) $k_1 h = 5;\ z_{01} = 0{,}9$; б) $k_1 h = 2{,}5;\ z_{01} = 0{,}1$.

Обобщенное решение является корректным всюду в области определения в отличие от классического решения [1], сингулярного на оси симметрии и в волноводе, и в полупространстве.

Обобщенное корректно описывает полное отражение как внутренне с аналитическим определением горизонтов полного внутреннего отражения в полном соответствии с гипотезой Ньютона. В классическом решении отражение является полным только по вертикальной составляющей вектора интенсивности во всем диапазоне углов падения. Горизонтальная компонента вектора интенсивности непрерывна с весом на границе раздела, что исключает возможность полного отражения.

Обобщенное решение физически корректно описывает захват энергии волноводом на частотах продольного резонанса в полном соответствии с аналогичным явлением в твердых волноводах. Амплитуда звукового давления на резонансных частотах имеет корневую особенность. В классическом решении захват энергии происходит на частотах толщинного

антирезонанса, на которых вся мощность источника локализована в полупространстве, а не в волноводе. Амплитуда звукового давления на антирезонансных частотах равна нулю.

Обобщенное решение принципиально содержит сходящиеся волны отдачи, формирующие зоны фокусировки на оси симметрии и коридоры вытекания в полупространстве. Классическое решение содержит только расходящиеся волны, что и является причиной сингулярности решения на оси симметрии.

Обобщенное решение предсказывает существование медленной обобщенной волны, соответствующей комплексному угловому спектру источника. В случае придонного расположения источника эта волна является доминирующей в суммарном звуковом поле и аналогична по своим свойствам волнам пограничного типа.

Обобщенное решение дает новую информацию о структуре звукового поля в волноводах, адекватную известным экспериментальным результатам аномального характера, не имевшим объяснения в рамках классической теории.

Литература

1. *Бреховских Л.М.* О поле точечного излучателя в слоисто-неоднородной среде // Изв. АН СССР. Серия физич. 1949. Т. 13. № 5. С. 505 – 545.
2. *Pekeris C.L.* Theory of propagation of explosive sound in shallow water // Geol. Soc. Am. Mem. 1948. № 27, P. 48-156.
3. *Завадский В.Ю., Крупин В.Д.* Применение численных методов для расчета звуковых полей в волноводах // Акуст. журн. 1975. Т. 21, №3. С. 484-485.
4. *Tain-Fu Gao, Er-Chang Shang.* Effect of the branch-cut on the transformation between modes and rays // J. Acoust. Soc. Am. 1983. Vol. 73, No. 5. P.1551-1555.
5. *Касаткин Б. А., Злобина Н. В.* Несамосопряженная модельная постановка граничной задачи Пекериса // ДАН. 2010. Т. 434. №4. С. 540-543.
6. *Касаткин Б.А., Злобина Н.В.* Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. М.: Наука, 2009. 496 с.
7. *Chapman D.M.* Using streamlines to visualize acoustic energy flow across boundaries // J. Acoust. Soc. Am. 2008. Vol.124. P. 48-56.

МЕДЛЕННЫЕ ОБОБЩЁННЫЕ ВОЛНЫ И ГЕНЕРАЦИЯ ВИХРЕЙ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ

Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин

Институт проблем морских технологий ДВО РАН
Россия, 690091 Владивосток, ул. Суханова, д. 5а
Тел.: (423) 2432834; Факс: (423) 2432416;
E-mail: kasatkas @marine.febras.ru

Введено понятие медленной обобщённой волны в слоистой среде как состоящей из неоднородной расходящейся волны и неоднородной сходящейся волны отдачи, которые пространственно разделены либо горизонтом полного внутреннего отражения, либо горизонтом источника. Аналитически описана составляющая модельного источника, структура которой полностью соответствует структуре медленной обобщённой волны. Наличие такой составляющей, соответствующей комплексным углам падения, подтверждает корректность введения медленных обобщённых волн и в звуковом поле, порождённом модельным источником в слоистой среде. Показано, что распространение обобщённых волн сопровождается генерацией вихревой составляющей вектора интенсивности как на горизонтах полного внутреннего отражения, так и на горизонте источника.

При исследовании звуковых полей в слоистых средах, как правило, используются простые типы волн, такие как расходящиеся (прямые), сходящиеся (обратные) и стоячие волны, которые считаются независимыми составляющими суммарного волнового процесса. Так, например, классическое описание звукового поля в волноводе Пекериса, предложенное в работе [1], содержит только расходящиеся волны, удовлетворяющие граничным условиям и условиям излучения, как в волноводе, так и в полупространстве. Однако другие решения той же граничной задачи, построенные в пионерской работе [2] и в последующих работах [3], [4] в классе расходящихся волн, оказались корректными только при описании звукового поля в самом волноводе, но не в полупространстве. Дело в том, что любое из этих решений содержит вытекающие нормальные волны комплексного спектра, амплитуда которых экспоненциально растёт в полупространстве, в силу чего само решение не удовлетворяет условию погашаемости, и как следствие, условию излучения в полупространстве.

Для устранения этого недостатка в работе [5] нами было предложено продолжение решения [4] в полупространство с образованием горизонтов полного внутреннего (TIR) отражения, соответствующих известной гипотезе Ньютона. При таком продолжении сами горизонты TIR играют роль каустических границ, при удалении от которых уровень звукового поля экспоненциально убывает. Однако при этом само звуковое поле на горизонтах полного внутреннего отражения теряет свойство локальной (p,v_z)-непрерывности по давлению и вертикальной компоненте вектора колебательной скорости, но сохраняет непрерывность по этим величинам в среднем. Принципиальная особенность такого решения, которое по построению является обобщённым, заключается в том, что суммарное звуковое поле содержит как расходящиеся, так и сходящиеся волны отдачи, которые являются собственными функциями двух сопряжённых операторов, описывающих граничную задачу Пекериса, а не одного самосопряжённого, как в классическом решении [1]. Сама модельная постановка граничных задач в акустике слоистых сред, в которой используются собственные функции двух сопряжённых операторов, названа нами несамосопряжённой (NSC) модельной постановкой в отличие от самосопряжённой (SC) модельной постановки, использованной при построении классического решения [1]. Комбинация расходящейся волны и сходящейся волны отдачи, которые пространственно разделены и соприкасаются только на горизонте полного внутреннего отражения, названа

нами обобщённой нормальной волной. В отличие от простейших волн, расходящихся или сходящихся, обобщённая нормальная волна содержит встречные потоки мощности, которые не являются скомпенсированными, как в стоячей волне. Сама комбинация волн всегда может быть определена так, чтобы результирующий поток мощности был положительно определённым, чему соответствует положительная определённость групповой скорости обобщённой волны.

Для выяснения корректности введения обобщённых нормальных волн в описание суммарного звукового поля нужно выяснить устройство модельного источника в диапазоне комплексных углов падения, которые не принимают участия в построении классического решения [1]. Как правило, в качестве модельного источника в таких задачах используется потенциал точечного источника, допускающий представление в виде интеграла Фурье-Бесселя или Ганкеля

$$\varphi_0(r,z)=\frac{e^{-ik_1R}}{R}=-i\int_0^\infty e^{-ik_{31}|z-z_0|}J_0(\xi r)\frac{\xi d\xi}{k_{31}}=-\frac{i}{2}\int_{-\infty}^{\infty}e^{-ik_{31}|z-z_0|}H_0^{(2)}(\xi r)\frac{\xi d\xi}{k_{31}}. \qquad (1)$$

$k_{31}^2=k_1^2-\xi^2$, $k_1=\omega/c_1$, ω, c_1-круговая частота и скорость звука в водной среде, z_0-горизонт источника, $R^2=(z-z_0)^2+r^2$. Представим потенциал (1) в виде суммы двух составляющих

$$\varphi_0(r,z)=g_1G_1(r,z)+g_2G_2(r,z),\quad g_1^2+g_2^2=1. \qquad (2)$$

$$G_1(r,z)=-\frac{i}{2}\int_{\Gamma_1}\frac{e^{-ik_{31}|z-z_0|}}{k_{31}}H_0^{(2)}(\xi r)\xi d\xi=-i\int_{-i\infty}^{k_1}\frac{\cos(k_{31}|z-z_0|)}{k_{31}}H_0^{(2)}(\xi r)\xi d\xi,$$

$$G_2(r,z)=-\frac{i}{2}\int_{\Gamma_2}F(r,z,\xi)\frac{\xi d\xi}{k_{31}}=\int_{k_1}^{\infty}F(r,z,\xi)\frac{\xi d\xi}{\alpha_1},\ k_{31}=\begin{cases}-i\alpha_1,\xi\in\Gamma_{21}\\+i\alpha_1,\xi\in\Gamma_{22}\end{cases} \qquad (3)$$

$$F(r,z,\xi)=\begin{cases}e^{-\alpha_1|z-z_0|}H_0^{(2)}(\xi r), & z>z_0\\ J_0(\xi r), & z=z_0\\ e^{-\alpha_1|z-z_0|}H_0^{(1)}(\xi r), & z<z_0\end{cases}$$

Одна из них $G_1(r,z)$ является аналитической функцией на плоскости комплексного спектрального параметра с разрезом $\operatorname{Im}k_{31}=0$ и представима контурным интегралом по контуру Γ_1. Другая составляющая $G_2(r,z)$ тоже представима контурным интегралом по контуру Γ_2, соответствующим разрезу $\operatorname{Re}k_{31}=0$, но от разрывной волновой функции, принимающей различные (сопряжённые) значения на берегах разреза в формуле (3). По этой причине составляющую $G_2(r,z)$ следует считать обобщённой составляющей модельного источника. Контуры интегрирования функций $G_1(r,z)$ и $G_2(r,z)$ представлены на рис. 1. Это означает, что модельный источник в представлении (2) задан не только скачком вертикальной компоненты вектора колебательной скорости на горизонте источника для составляющих вещественного углового спектра, но и скачком волновой функции на горизонте источника для составляющих комплексного углового спектра. Лучевая трактовка линий тока в поле вектора интенсивности для составляющих $G_1(r,z)$ и $G_2(r,z)$ показана на рис. 1, *c*, *d*.

Если решение граничной задачи ищется в классе аналитических функций, то в представлении (2) нужно положить $g_1=1$, $g_2=0$. В этом случае под модельным источником подразумевается только его аналитическая составляющая $G_1(r,z)$. При таком выборе модельного описания источника комплексный угловой спектр источника не участвует при построении решения, которое по своим свойствам оказывается самосопряжённым. Несамосопряжённая модельная постановка соответствует более общему представлению

модельного источника (2), в котором весовые коэффициенты g_1, g_2 определяются из энергетических соображений формулами

$$g_1^2 = \frac{P_0}{P_0 + P_c}, \quad g_2^2 = \frac{P_c}{P_0 + P_c}, \tag{4}$$

где P_0 - мощность, соответствующая вещественному угловому спектру источника, P_c - мощность, соответствующая комплексному угловому спектру источника. Принципиальная особенность NSC модельной постановкой заключается в том, что в слоистой среде комплексный угловой спектр источника возбуждает обобщённые формы волнового движения (медленные обобщённые волны), разрывные либо на горизонте источника, либо на горизонтах TIR. Такая структура звукового поля полностью соответствует разрывной структуре обобщённой составляющей $G_2(r,z)$ модельного источника. Для обобщённых форм волнового движения мощность излучения в слоистой среде, связанная с комплексным угловым спектром источника, отлична от нуля, а на самих горизонтах разрыва обязательно генерируется вихревая составляющая вектора интенсивности, представителем которой является знакопеременная вертикальная компонента этого вектора. Обратимся к известным примерам решения граничных задач в этом более сложном случае.

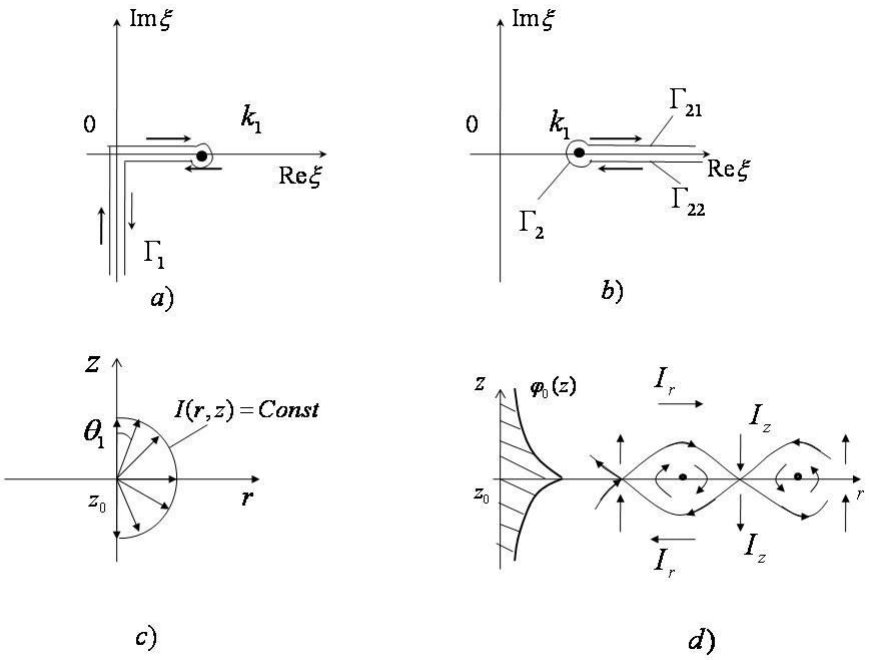


Рис. 1. Контуры интегрирования и верхние листы: a) $\operatorname{Im} k_{31} \le 0$, b) $\operatorname{Re} k_{31} \ge 0$ и лучевая трактовка линий тока для составляющих модельного источника: c) $G_1(r,z)$, d) $G_2(r,z)$

При помещении модельного источника в слоистое пространство физической причиной появления обобщённых волн в суммарном решении является сам факт несоответствия сферической симметрии источника и осевой симметрии звукового поля, возбуждаемого таким модельным источником в слоистой среде. В силу такого несоответствия любая составляющая углового спектра источника будет отражаться от плоской границы раздела не только расходящейся сферической волной, но и сходящейся волной отдачи. Модельная постановка граничной задачи, учитывающая появление сходящихся волн отдачи в суммарном звуковом поле, должна быть по определению NSC модельной постановкой. Особенности решения классической граничной задачи на отражение сферической волны на границе раздела двух жидких сред в NSC модельной постановке

рассмотрены нами в работе [5]. Другая особенность обобщённого решения заключается в появлении в суммарном решении медленной обобщённой волны (SGV), возбуждаемой комплексным угловым спектром источника. Эта волна, являясь неоднородной волной, соответствует полюсу коэффициента отражения, а скорость её распространения меньше скорости звука в водной среде. По этому признаку SGV является аналогом пограничных волн типа Рэлея, Шолте, Стоннели, но возбуждается на границе раздела двух жидких сред. Мощность, соответствующая комплексному угловому спектру источника, помещённого в слоистую среду, отлична от нуля, а следовательно, SGV становится физически реализуемой и экспериментально наблюдаемой. Волна давления на границе раздела двух жидких сред, соответствующая SGV, описывается выражением

$$p^{(2)}(r,z) = g_2 \omega \rho_1 \frac{\pi \alpha_{10}}{1-\rho_{12}^2}[a_1 p_{01}^{(2)}(r,z) + a_2 p_{02}^{(2)}(r,z)]$$

$$p_{01}^{(2)}(r,z) = \begin{pmatrix} 2ch\alpha_{10} z_0 \cdot e^{-\alpha_{10} z} \cdot H_0^{(2)}(k_0 r) \\ e^{-\alpha_{10} z_0}[e^{\alpha_{10} z} H_0^{(1)}(k_0 r) + e^{-\alpha_{10} z} H_0^{(2)}(k_0 r)] \\ e^{-\alpha_{10} z_0}[e^{\alpha_{20} z} H_0^{(1)}(k_0 r) + e^{-\alpha_{20} z} H_0^{(2)}(k_0 r)] \\ 2ch\alpha_{10} z_0 \cdot e^{\alpha_{20} z} \cdot H_0^{(1)}(k_0 r) \end{pmatrix} \begin{matrix} z \ge z_0 \\ z \in (z_0, 0) \\ z \in (0, -z_{t0}) \\ z \le -z_{t0} \end{matrix}$$

$$p_{02}^{(2)}(r,z) = \begin{pmatrix} e^{-\alpha_{10} z}[e^{\alpha_{10} z_0} H_0^{(1)}(k_0 r) + e^{-\alpha_{10} z_0} H_0^{(2)}(k_0 r)] \\ e^{-\alpha_{10} z_0}\, 2ch\alpha_{10} z \cdot H_0^{(2)}(k_0 r) \\ e^{-\alpha_{10} z_0}\, 2ch\alpha_{20} z \cdot H_0^{(2)}(k_0 r) \\ e^{\alpha_{20} z}[e^{\alpha_{10} z_0} H_0^{(2)}(k_0 r) + e^{-\alpha_{10} z_0} H_0^{(1)}(k_0 r)] \end{pmatrix} \begin{matrix} z \ge z_0 \\ z \in (z_0, 0) \\ z \in (0, -z_{t0}) \\ z \le -z_{t0} \end{matrix}$$

$p_{01}^{(2)}(r,z)$ - диполь - дипольная составляющая SGV, $p_{02}^{(2)}(r,z)$ - квадрупольная составляющая SGV, образующие ортогональную пару волн, a_1, a_2-парциальные коэффициенты возбуждения, удовлетворяющие условию $a_1^2+a_2^2=1$.

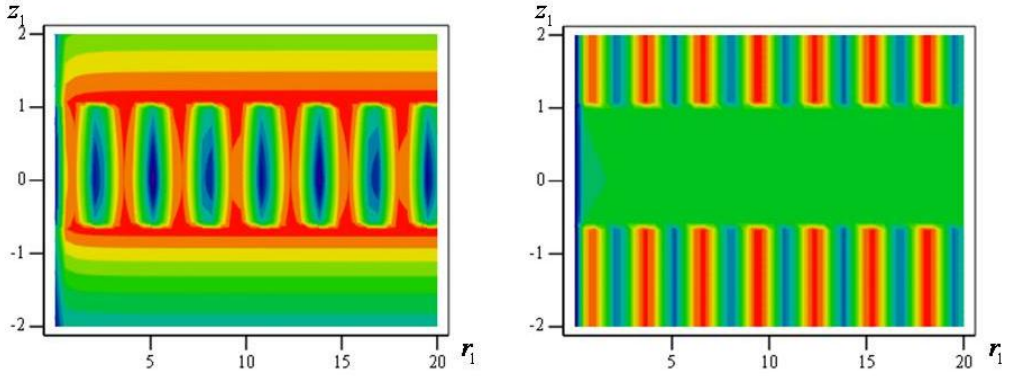
$$z_{t0} = \rho_{12} z_0, k_0 = k_1 \sqrt{\frac{1-\rho_{12}^2 c_{12}^2}{1-\rho_{12}^2}}, \frac{\alpha_{10}}{k_1} = \rho_{12}\sqrt{\frac{1-c_{12}^2}{1-\rho_{12}^2}}, \alpha_{20} = \frac{\alpha_{10}}{\rho_{12}}, \ \rho_{12}=\rho_1/\rho_2,\ c_{12}=c_1/c_2$$

ρ_1, ρ_2 -плотность в водной среде с источником и донном полупространстве, $k_2=\omega/c_2$, c_2-скорость звука в полупространстве.

$$a_1^2 = \frac{E_1}{E_1+E_2}, a_2^2 = \frac{E_2}{E_1+E_2}, E_1 = 1-\rho_{12}^2, E_2 = (1+\rho_{12}^2)\alpha_{10} z_0 + \rho_{12}^2 sh2\alpha_{10} z_0$$

Результаты компьютерного моделирования SGV поясняются рис.2 для случая диполь - дипольной (рис.2a) и квадрупольной (рис.2b) ориентации горизонтальных потоков мощности. В случае SGV вихревая составляющая вектора интенсивности генерируется на горизонте источника и на горизонте TIR. Вычисляя мощность, переносимую SGV вдоль границы раздела, получаем оценку коэффициентов g_1, g_2 в определении (4) в суммарном решении граничной задачи на отражение сферической волны на границе раздела двух жидких сред в NSC модельной постановке

$$P_c = P_0 K, K = \frac{\alpha_{10}}{k_1} \frac{2\pi \cdot e^{-2\alpha_{10} z_0}}{(1-\rho_{12}^2)^2} \frac{E_1^2+E_2^2}{E_1+E_2} \quad g_1^2 = \frac{P_0}{P_0+P_c} = \frac{1}{1+K}, g_2^2 = \frac{K}{1+K}, P_0 = \frac{1}{2}\omega\rho_1 k_1 4\pi$$



a) b)

Рис.2 Звуковое поле, соответствующее SGV: a)-диполь - дипольная структура, b)-квадрупольная структура горизонтальных потоков мощности, $z_1=z/z_0$, $r_1=r/z_0$, $k_1z_0=1$

Парциальные коэффициенты возбуждения двух составляющих SGV таковы, что в поле придонного источника доминирует диполь - дипольная составляющая, а в поле источника, удалённого от границы раздела, доминирует квадрупольная составляющая. Можно отметить, что при придонном расположении источника мощность, приходящаяся на SGV, может в несколько раз превосходить мощность, излучаемую вещественным спектром модельного источника в свободное пространство, и в этом заключается принципиальная особенность NSC модельной постановки. Другая особенность заключается в генерации вихревой составляющей вектора интенсивности на горизонте источника и на горизонте TIR, как это подтверждено теоретически и экспериментально в работе [6]. Для SGV диполь – дипольного типа вихревая составляющая доминирует в коридоре, ограниченном горизонтом источника и горизонтом TIR, формируя в нём поле типа стоячей волны. Для SGV квадрупольного типа вихревая составляющая доминирует вне этого коридора, как это поясняется рис.2.

Учёт SGV в суммарном звуковом поле, возбуждаемом модельным источником в слоистой среде, принципиально изменяет его энергетику и структуру, следовательно, несёт новую информацию о самом звуковом поле.

Литература

8. *Бреховских Л.М.* О поле точечного излучателя в слоисто-неоднородной среде // Изв. АН СССР. Серия физич. 1949. Т. 13. № 5. С. 505 – 545.

9. *Pekeris C.L.* Theory of propagation of explosive sound in shallow water // Geol. Soc. Am. Mem. 1948. № 27, P. 48-156.

10. *В.*Ю. Завадский, В. Д. Крупин Применение численных методов для расчёта звуковых полей в волноводах. Акуст. журн. 1975, т.21, №3, с.484-485.

11. *Tain*-Fu Gao, Er-Chang Shang Effect of the branch-cut on the transformation between modes and rays J. Acoust. Soc. Am. 73(5) May 1983, p.1551-1555.

12. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Модельные задачи в акустике слоистых сред. Владивосток, Дальнаука, 2012. 256с.

13. Щуров В.А., Черкасов А.В., Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Аномальные особенности структуры поля вектора интенсивности в акустических волноводах. // Подводные исследования и робототехника. Владивосток. Дальнаука. 2011. №2 (12). С. 4-17

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ СИСТЕМ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Ю.Н. Моргунов, А.А. Голов

ТОИ ДВО РАН, г. Владивосток, golov_alexander@inbox.ru

В работе представлены результаты экспериментального тестирования метода повышения точности системы акустического позиционирования. Цель исследования заключалась в определении возможности компенсирования влияния суточных изменений гидролого-акустических характеристик водной среды на точность определения местоположения имитатора приёмной системы автономного подводного аппарата (ИПС АНПА) в шельфовой зоне

Отделом технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН в течение нескольких лет проводятся исследования, направленные на разработку технических решений для перспективных навигационных систем автономных подводных необитаемых аппаратов (АНПА) дальнего радиуса действия. Результаты исследований показали высокую эффективность применения в задачах акустической дальнометрии и навигации низкочастотных псевдослучайных сигналов. На трассах протяженностью от десятков до сотен километров экспериментально получены точности измерения расстояния в сотые процента. Получение столь высоких точностей стало возможным при корректном учете изменяющихся во времени и пространстве полей температур (скоростей звука) при постобработке результатов измерений на основе гидрологической аттестации акваторий [1]. Тогда же была поставлена задача, разработать метод для обеспечения навигационных измерительных систем данными об изменении эффективных скоростей звука в реальном времени. Ниже приведены основные положения разработанного метода [2].

1. Источники навигационных сигналов устанавливаются вблизи дна на небольшом (сотни метров) удалении от береговой черты. В работе [1] показано, что такое расположение имеет ряд достоинств при решении задач позиционирования подводных объектов дальнего радиуса действия: экономия кабеля, безопасность в районах с интенсивным рыболовством и эффективное “озвучивание” шельфа и глубокого моря на расстояниях в сотни километров.

2. На акватории функционирования АНПА устанавливаются “опорные”, заякоренные или дрейфующие, приемные системы с передачей принятых навигационных сигналов и координат с GPS (для дрейфующего варианта) по радиоканалу на береговой пост или на обеспечивающее судно. Приемные гидрофоны размещаются на глубине функционирования АНПА. Количество приемных и излучающих систем и их расположение определяется индивидуально для каждой акватории.

3. Применение широкополосных импульсных псевдослучайных сигналов типа М-последовательностей позволяет использовать импульсные характеристики волноводов, соединяющих корреспондирующие точки навигационных схем, для выделения и идентификации характерных приходов акустической энергии по лучевым траекториям с возможностью расчета их длины. На выходе коррелятора приемной системы АНПА выделяются импульсы от источников, превышающие заданный порог и определяются времена их распространения. Затем значения времен умножаются на эффективную скорость звука (определяется в начале выполнения миссии), вычисляются расстояния АНПА до каждого источника и его координаты. С выхода корреляторов “опорных” приемных систем

на береговом посту или на обеспечивающем судне выделяются импульсные характеристики волноводов между корреспондирующими точками и выводятся на дисплей оператора и в программный блок для проведения расчетов, описанных выше для АНПА. При изменении температурного режима на акватории на дисплее оператора будет зафиксировано изменение временной структуры импульсной характеристики, которое может быть качественно квалифицировано как, например, приливный фронт или внутренние волны. Изменения температурного фона на акустических трассах приведет к изменениям скорости звука и, следовательно, к изменениям рассчитанных расстояний от источников навигационных сигналов до “опорных“ приемных систем, т.е. к ошибкам измерения координат в данном месте и в данное время. При правильном размещении “опорных“ приемных систем, при котором изменения температурного фона наступают приблизительно одновременно на трассах, соединяющих источники с приемной системой АНПА и одной из “опорных“ систем (ближайшей), эти ошибки могут быть отнесены к текущим координатам АНПА и скорректированы. Для этого возможны два варианта: передача измененной скорости звука по гидроакустическому каналу в расчетный блок АНПА или корректировка начального времени посылок навигационных сигналов.

Для апробации разработанного метода в сентябре 2011 года в бухте Витязь, залива Посьета, Японского моря был проведен модельный эксперимент с использованием мобильных систем для исследований в области акустической навигации. Подробное описание их технических характеристик приведено в работах [3-4]. В качестве источников навигационных сигналов применялись два пьезокерамических излучателя S1 и S2, установленных у дна на глубинах 9 и 10 м соответственно (рис. 1).

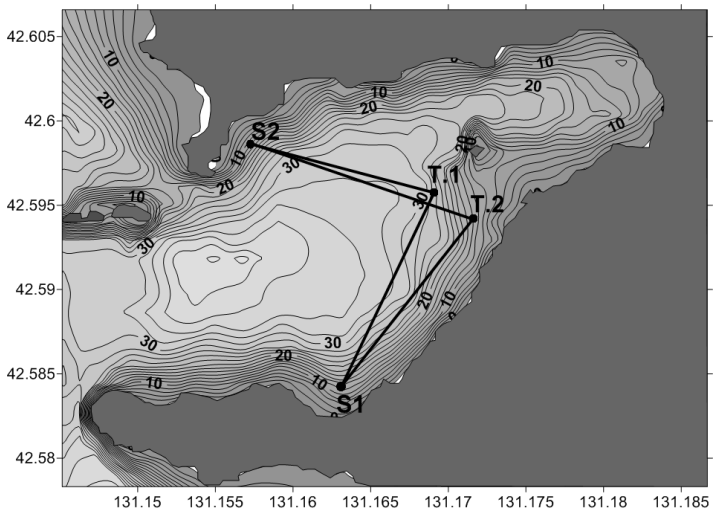


Рис.1. Схема эксперимента. Расположение приёмников и излучателей, акустические трассы

Они ежеминутно излучали сложные фазоманипулированные сигналы типа М-последовательностей с несущей частотой 2000 Гц. На яхте, дрейфующей вокруг точки постановки на якорь, размещался имитатор приемной системы (ИПС) АНПА (рис.1, т.1). Он состоял из гидрофона, опускаемого с борта на заданную глубину, системы GPS и радиобуя для ретрансляции принятых навигационных сигналов и координат с GPS на береговой (судовой) пост. Принятые гидрофоном сигналы в корреляторе сворачивались с репликой излученных, что позволило получить импульсные характеристики волноводов на

соответствующих акустических трассах и выделить первые импульсы от каждого источника, преодолевшие заданный порог превышения над помехой. На рисунках 2,3 представлены нормированные импульсные характеристики волноводов и их модели, посчитанные с помощью методов лучевой акустики.

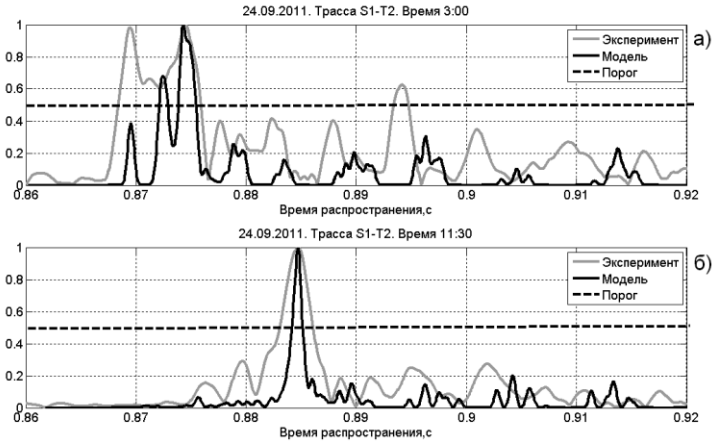


Рис.2. Нормированные импульсные характеристики волновода на трассе S1-T2: а) момент отлива; б) момент прилива

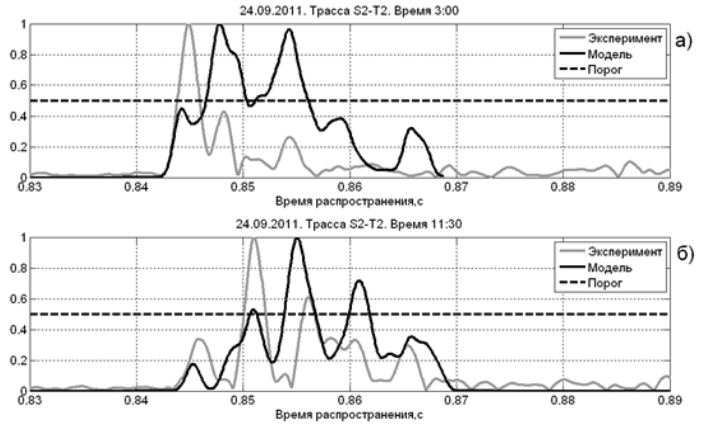


Рис.3. Нормированные импульсные характеристики волновода на трассе S2-T2: а) момент отлива; б) момент прилива

По измеренным временам распространения импульсов от навигационных источников и расстояниям от них до ИПС (по данным с GPS) в начале эксперимента были рассчитаны эффективные скорости звука на обеих трассах, которые в дальнейшем, при дрейфе ИПС использовались для расчета расстояний. Они оказались одинаковыми для данного момента времени и составили 1512 м/с. Далее, в процессе перемещения ИПС относительно якоря, ежесекундно фиксировались его координаты по GPS, по ним рассчитывались расстояния до источников, ежеминутно вычислялись расстояния до источников по акустическим данным и определялись ошибки измерений по разности расстояний, рассчитанных по GPS (они взяты за эталон) и по акустическим данным (рис.4 б,г; линия 1).

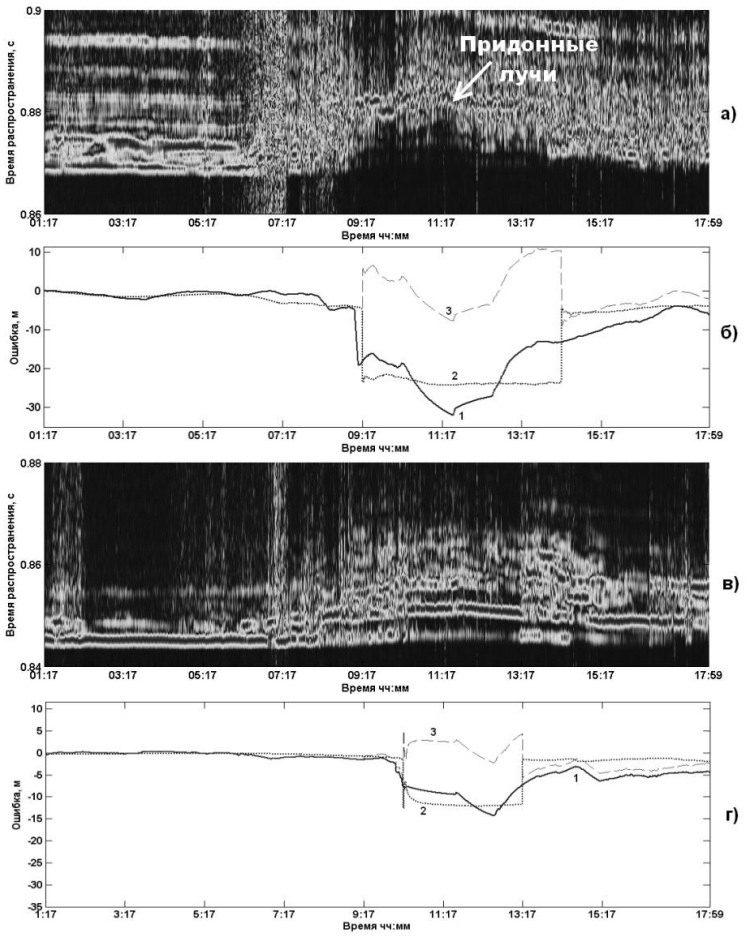


Рис.4. а) Импульсная характеристика волновода на трассе S1-T2;
б) зависимость от времени ошибок определения дистанций между излучателем S1 и точками 1 и 2;
в) импульсная характеристика волновода на трассе S2-T2;
г) Зависимость от времени ошибок определения дистанций между излучателем S2 и точками 1 и 2.

В точке 2, на дне, на глубине 18 метров был установлен “опорный” гидрофон (глубина гидрофона ИПС также составляла 18 метров). Принятые гидрофоном сигналы в корреляторе сворачивались с репликой излученных, что позволило получить импульсные характеристики волноводов на соответствующих акустических трассах, которые выводятся на монитор оператора (рис.4 а,в). Мы видим, что в течение эксперимента амплитудно-временная структура претерпевает существенные изменения. Сопутствующие измерения вертикального распределения температуры (скорости звука) показали, что с 09:17 часов на трассе S1 – T.2 и с 10:17 на трассе S2 – T.2 зафиксирован заход в придонные слои холодной воды. По временам пробега первых импульсов, преодолевших заданный порог превышения над помехой, рассчитывались расстояния между источниками и “опорным” гидрофоном с использованием значения эффективной скорости 1512 м/с. Разность между полученными значениями и реальными координатами “опорного” гидрофона также выводится на монитор (рис.4 б,г; линия 2). Таким образом, оператор получает информацию об ошибках измерения расстояний от источников, которые связаны с изменчивостью эффективной скорости звука (температурного режима в волноводе) в период проведения эксперимента. На трассе S1 – T.2 , приблизительно совпадающей с направлением север-юг, до 9:17 часов ошибка составляет несколько метров (в пределах точности GPS), а затем увеличивается до 30 метров, т.е. эффективная скорость звука уменьшается до 1486 м/с. На трассе S2 – T.2, приблизительно

совпадающей с направлением восток-запад, до 10:17 часов ошибка также составляет несколько метров, а затем увеличивается до 10 метров (эффективная скорость звука 1502 м/с). Так как ошибки измерения расстояний четко коррелируют с вариациями импульсных характеристик (рис.4), т.е. имеют физическое обоснование, то оператор должен передать изменившиеся эффективные скорости звука на расчетный блок АНПА. Если АНПА в данный момент времени маневрирует в зоне действия той же температурной аномалии, что и “опорный” гидрофон, то отклонение от заданного курса будет скорректировано.

В нашем случае вместо АНПА перемещается вокруг точки постановки на якорь яхты (в пределах окружности около 30 метров) ИПС АНПА и мы определили ошибки измерения расстояний в этот период времени (рис.4 б,г; линия 1). Анализ зависимостей, отображающих ошибки на ИПС и “опорном” гидрофоне показывает, что они имеют один порядок величин по направлениям север-юг и восток-запад. Внесение в расчетный блок ИПС значений изменившихся скоростей звука (1486 и 1502 м/с) снижает ошибки в три раза (рис.4 б,г; линия 3) и они находятся в пределах точности GPS.

Таким образом, в условиях натурного эксперимента был апробирован метод, технические и вычислительные решения для повышения точности позиционирования АНПА в наиболее сложных для данного района гидрологических условиях (распространение холодного приливного фронта из глубокого моря в шельфовую зону Японского моря). Особенно следует подчеркнуть, что импульсные отклики волноводов на трассах существенно отличались. Это характеризует наличие неоднородностей температурного поля в диагностируемой акватории не только в вертикальной плоскости, но и в горизонтальной. Результаты, обсуждаемые в работе, являются продолжением серии экспериментальных работ, направленных на внедрение методов акустической томографии в решение актуальных задач подводной дальнометрии и навигации. Обсуждаемый эксперимент был задуман как демонстрационный, т.к. проводился на небольшой мелководной акватории. Но характеристики излучающих и приемных трактов (низкие частоты, помехоустойчивая сигнальная информация, дальность радиоканала 20 км) позволяют рассчитывать на их успешное применение на акваториях в сотни квадратных километров.

Литература

1. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов. Ю.Н. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирование импульсной характеристики в глубоком море // Акустический журнал, 2010, том 56, №1, с.51-52.
2. Моргунов Ю. Н, Голов А. А., Стробыкин Д. С. Кисеон Ким, Чансан Ким, Шинрае Ро. Акустико-Гидрофизическое тестирование мелководной акватории в прибрежных водах Корейского пролива// Акустический журнал, 2012, том 58, № 3, с. 350–355.
3. Акуличев В.А., Безответных В.В., Каменев С.И., Кузьмин Е.В., Моргунов Ю.Н., Нужденко А.В. Акустическая томография динамических процессов в шельфовой зоне моря с использованием сложных сигналов // Акуст. журн., 2002. Т. 48. № 1. С. 5–11.
4. Голов А.А., Азаров А.А., Лебедев М.С., Моргунов Ю.Н. Методы акустической томографии в задачах подводной навигации.// Подводные исследования и робототехника, 2012, №1, с.52-56.

МОНИТОРИНГ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ (СХЕМА РЕАЛИЗАЦИИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ)

Ю.А. Половинка, А.О. Максимов

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел /факс: (423)2311631/(423)2312573
e-mail: yrivlad@poi.dvo.ru

В докладе рассмотрены «Метод пассивного акустического мониторинга придонных газожидкостных потоков» и схема его реализации с помощью «Геоакустического комплекса пассивного обнаружения придонных газожидкостных потоков». Указанные метод и комплекс могут использоваться, во-первых, в составе систем экологической безопасности, для обнаружения утечек газа из подводных газопроводов и технических систем добычи углеводородов. Во-вторых, в научно-исследовательских и производственных целях, для локализации природных источников газов и количественной оценки объемов газовых потоков в придонной области.

Определение мест выходов и измерение параметров газовых пузырьковых потоков в натурных условиях и в производственных процессах является важной задачей в широком диапазоне приложений. Например, предсказание и описание газообмена в приповерхностном слое моря, поиск и изучение выходов газогидратов (сипов) на дне, технологический контроль подводных газопроводов, массоперенос в газовых химических реакторах и многие другие процессы в природе и технике.

Методы и технические системы, разрабатываемые в рамках решения данной задачи, основаны на оптических и акустических измерениях. Каждый из подходов имеет свои плюсы и минусы. Оптические методы сильно зависят о степени турбулентности среды и требуют использование широкого рабочего диапазона частот. Акустические измерения могут быть активными и пассивными. Активные акустические измерения позволяют определять параметры газожидкостных потоков на больших площадях и в широком диапазоне дистанций. В тоже время выполнение измерений и обработка первичной информации требует использования сложных технических систем и физических моделей процессов взаимодействия звука и пузырьков. Использование пассивных (эмиссионных) акустических методов для обнаружения выходящих в водную среду пузырьков и измерения их размеров является перспективным направлением, как в геофизических исследованиях, так и при создании систем безопасности подводных газопроводов с точки зрения надежности, длительного времени работы, стоимости реализации и эксплуатации.

В работах [1,2] описаны возможные технические решения и алгоритмы обработки акустических сигналов от газожидкостных потоков с целью определения мест выхода и расчета объемов выходящих в области дна потоков газа. Недостатками указанных разработок является низкая точность локализации источника акустической эмиссии из-за движения гидрофона и необходимости позиционирования в пространстве подводного измерительного блока. Используемая модель эмиссионного излучения пузырьков не учитывает их взаимной корреляции в звуковом поле, что приводит к погрешностям расчета спектральной плотности мощности акустического шума $S(\omega)$ в дальнем поле от облака пузырьков, и не позволяет корректно провести инверсию полученных эмиссионных спектров. Расчет функции распределения пузырьков по размерам производится для случая небольшой объемной плотности пузырьков в момент их выхода из источника, что ограничивает применение метода в ситуациях техногенных утечек газа и для многих природных источников газа на дне, где наблюдаются большие объемные плотности пузырьков. Не учитывается дипольный характер излучения пузырьков вблизи дна или

технических систем. Также эффективность предлагаемых методик зависит от уровня окружающих шумов, обусловленных как движением приемника акустических сигналов, так и шумами техногенного характера.

Отмеченные выше недостатки приводят к ошибкам определения формы эмиссионного спектра и его конкретных значений и, как следствие, к снижению достоверности определения функции пузырьков по размерам и объема выходящего газа.

Предлагаемые решения направлены на расширение возможностей систем пассивного мониторинга путем увеличения количества измеряемых параметров газожидкостных потоков, повышения точности локализации источника акустической эмиссии и количества выходящего газа. Поставленная задача решается с помощью геоакустического комплекса пассивного обнаружения придонных газожидкостных потоков [3]. Схема комплекса для варианта мониторинга подводного газопровода, приведена на рис.1.

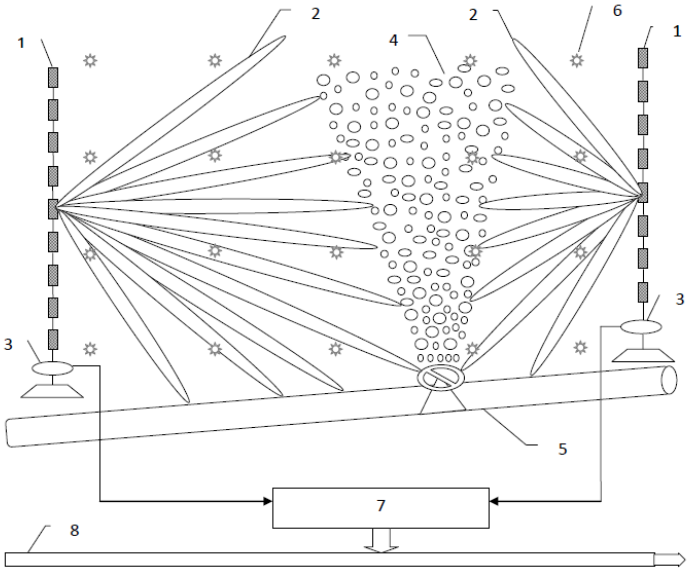


Рис.1. 1 - вертикальные гидроакустические антенны с веерными диаграммами направленности
2, 3 - блок первичной обработки сигнала, 4 – область выхода газожидкостного потока,
5 - заданный объект контроля (газопроводная труба),
6 – расположение точек калибровки системы,
7 – блок вычислительного многопроцессорного устройства (ВМУ),
8 – канал энергообеспечения и связи для передачи информации.

Работа комплекса осуществляется следующим образом. В заданном районе устанавливают как минимум две антенны 1, снабженных блоками первичной обработки сигнала 3. Максимальное количество антенн практически неограниченно и определяется протяженностью контролируемых объектов или исследуемой площадью природного объекта. Например, для контроля линейных отрезков подводных газопроводов небольшой протяженности требуется не более двух, а для контроля областей природных выходов газа или технических объектов, имеющих распределенную конфигурацию на дне, требуется не менее трёх антенн. Антенны 1 закрепляются стационарно на дне и имеют круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости и многолучевую веерную диаграмму направленности 2 в вертикальной плоскости. Веерные диаграммы направленности приемных антенн формируются с помощью блока первичной обработки сигнала 3. Блоки первичной обработки сигналов приемных антенн соединяют кабелем с ВМУ - 7, данные с которого передаются в центр сбора информации для принятия решений по кабелю - 8. Перед началом мониторинга заданного объекта в районе работ производят акустическую калибровку приемных антенн. Для этого источник акустического шума, энергетический

спектр сигнала которого имеет известное постоянное значение в рабочем диапазоне частот от 500Гц до 100кГц, последовательно помещают в равноудаленные друг от друга точки пространства 6 вдоль трубопровода 5 или в узловые точки трехмерной решетки покрывающей область возможного выхода газа 4. Выполняют прием и передачу сигналов белого шума, полученных со всех углов веерной диаграммы направленности с каждой из антенн 1, при нахождении имитатора в точках калибровки в блок 7 (ВМУ), где выполняют интерполяцию измеренных спектров калибровки на промежуточные точки и сохраняют полученные результаты с целью использования в последующих измерениях. Затем осуществляют прием сигналов эмиссионного излучения антеннами 1 из области пространства 4 между ними. Веерные диаграммы направленности приемных антенн формируются с помощью блока первичной обработки сигнала 3.

Также в блоке 3 производится идентификации эмиссионных сигналов, принятых с различных направлений (углов) для каждой антенны. Сигналы и результаты их пространственно-временной идентификации передаются в блок 7 (ВМУ), где по результатам взаимно корреляционной обработки сигналов во времени выполняется определение момента времени и места выхода газовых пузырьков. Параллельно с расчетом функций взаимной корреляции сигналов с двух антенн в блоке 7 (ВМУ) определяют спектры мощности этих же сигналов. Спектры мощности сигналов, корреляционные функции которых используются для определения места выхода газового потока, после предварительной нормировки также используют для определения функции распределения пузырьков по размерам. Нормировку спектров сигналов принятых антеннами, выполняют путем умножения коэффициента передачи по спектру в области выхода газа на измеренный спектр сигнала акустической эмиссии.

Определение функции распределения пузырьков по размерам производится в блоке 7 на основании алгоритма инверсии (АИ). Данные измерений и результаты обработки со всех модулей передаются по каналу связи и энергообеспечения 8 в центр управления для оценки ситуации и принятия решений. Использование комплекса для мониторинга протяженных производственных объектов или участков дна с выходами сипов на большой площади производится путем размещения дополнительных приемных антенн и их синхронизации во времени для совместной работы. Ввиду более высокой чувствительности и помехозащищенности при регистрации сигналов акустической эмиссии с помощью вертикальных антенн, обнаружение источников эмиссии, возможно на дистанциях значительно превышающих, аналогичные дистанции для систем, основанных на регистрации сигналов одиночными приемниками.

В качестве аппаратурной реализации предлагаемого комплекса, на основе применяемых в настоящее время в подводной акустике технических устройств, могут использоваться: многоэлементная вертикальная приемная антенна типа СИ ГАП «Нева-ИПФ» на базе цифровых гидрофонов ЦГП-3 с якорным устройством и гермоконтейнером с аппаратурой, имеющая частотный диапазон измерений от 5Гц до 100кГц, с возможностью передачи цифровых сигналов с гидрофонов антенны по кабелю связи в блок ВМУ. Блок ВМУ может быть реализован на базе вычислительных машин реального времени типа Audio Speedgoat Real-time Target Machine(s) и с использованием многопроцессорных плат (до 1000 процессоров) спектрально-корреляционной обработки типа NVIDIA Tesla® K20-K20X GPU Accelerators, работающих в среде MatLab, на основе алгоритма параллельных вычислений и многопроцессорных алгоритмов CUDA™ для быстрого преобразования Фурье и корреляционной обработки сигналов.

Алгоритм инверсии (АИ) и расчеты, связанные с локализацией мест выходов газовых потоков [4] реализуются с помощью вычислительного многопроцессорного устройства 7, рис.1, блок-схема и функции которого представлены на рис.2.

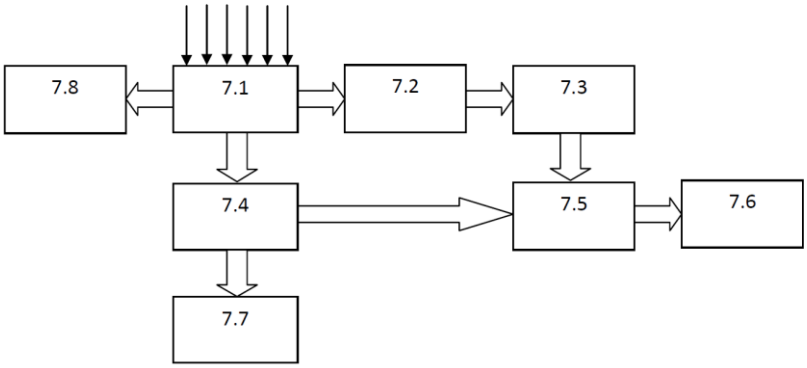


Рис.2. Состав ВМУ: 7.1 – блок многоканального коммутатора, 7.2 – блок коррелятора сигналов, 7.3 – блок определения положения области выхода газа, 7.4 – блок определения спектров сигналов, 7.5 – блок нормировки спектров, 7.6 – блок расчета пространственных функций распределения пузырьков по размерам, 7.7 – блок идентификации собственных частот газового «факела», 7.8 – блок определения диаграммы направленности сигнала эмиссии.

Определение моментов времени и мест выхода газовых пузырьков выполняется с помощью взаимно корреляционной обработка сигналов с антенн во времени (блок 7.2), поиска максимумов функций корреляции между сигналами, полученными с различных направлений и определения временного сдвига (лага) для функций, имеющих максимумы. Расчет дистанций, до источника эмиссии производится по формуле: $d_{1,2} = C_{зв} \times \tau_{1,2}$, где – $d_{1,2}$ расстояние от центров первой – 1 и второй – 2 антенн до источника эмиссии, $C_{зв}$ – скорость звука и $\tau_{1,2}$ – времена сдвигов (лаги) корреляционных функций каждой антенны. Положение источника находится (блок 7.3) стандартным методом, нахождения точек пересечения окружностей, с радиусами, соответствующими рассчитанным дистанциям $d_{1,2}$.

Алгоритм инверсии включает представление значений нормированного, с учетом калибровки, спектра эмиссионного сигнала в месте выхода газового потока $S_{norm}(\omega)$ в виде

$$S_{norm}(\omega) = \int_0^{\infty} D(R_0) \left| X_b(\omega; R_0) \right|^2 dR_0 \tag{1}$$

где $D(R_0)$ – распределение по размерам эмиссионных пузырьков как функция их резонансных радиусов R_0, так что $\int_{R_1}^{R_2} D(R_0) dR_0$ является числом пузырьков, генерируемым за секунду в диапазоне радиусов (*R1, R2*). Резонансные радиусы R_0 связаны с резонансными частотами пузырьков ω_0 согласно выражению

$$\omega_0 = \frac{1}{R_0\sqrt{\rho_0}} \times \left(\sqrt{3k(p_0 - p_v + \frac{2\sigma}{R_0}) - \frac{2\sigma}{R_0} + p_v - \frac{4\eta}{\rho_0 R_0^2})} \right) \times \left(1 - \frac{\rho_0 - \beta}{\rho_0 + \beta} \frac{R_0}{2d} \right)^{-\frac{1}{2}} \tag{2}$$

где p_v – давления пара, σ – поверхностное натяжение жидкости, η – сдвиговая вязкость, k – индекс политропы, изменяется между γ (отношение удельной теплоты газа при постоянном давлении к значению удельной теплоты газа при постоянном объеме) и единицей, в зависимости от того, ведет ли газ себя адиабатически, изотермически или некоторым промежуточным способом, $\beta = \rho_0 \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right)$, ν – коэффициент Пуассона в осадках.

Выражение $\left|X_b(\omega;R_0)\right|^2$ – представляет собой квадрат преобразования Фурье амплитуды дипольного излучения одиночного пузырька в дальнем поле, выражение для которого имеет вид

$$X(\omega;R_0)=\left((\omega_0R_0)^2\frac{\rho_0}{r}R_{\varepsilon 0n}\right)\times\frac{\omega_0\delta_{tot}/2+i\omega}{\left[\omega_0\delta_{tot}/2+i\left(\omega-\omega_0\right)\right]\left[\omega_0\delta_{tot}/2+i\left(\omega+\omega_0\right)\right]}\times\left(1-\frac{\rho_0-\beta}{\rho_0+\beta}\frac{R_0}{2d}\right) \quad (3)$$

где r – это расстояние до точки измерения эмиссионного излучения, $R_{\varepsilon 0n}$ – амплитуда осцилляций стенки пузырька *n*-го пузырька, Экспоненциальное затухание для пузырька, который осциллирует на собственной частоте ω_0, имея начальную амплитуду $R_{\varepsilon 0n}$, описывается общим безразмерным коэффициентом затухания δ_{tot}. Для оценки числа пузырьков по измерениям спектра мощности в дальнем поле решается уравнение (1) для $D(R_0)$ и нормированного $S_{norm}(\omega)$, с учетом выражений (2) и (3) .

В отличие от известных алгоритмов, в предлагаемом методе используются сигналы акустической эмиссии, полученные с помощью вертикальных приемных антенн с веерной диаграммой направленности, которые предварительно калибруются, с использованием источника акустического шума с равномерным спектром, а используемая физическая модель учитывает корреляцию пузырьков в звуковом поле и дипольный характер их излучения.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для поддержки научных школ (НШ-1052.2012.5), гранта РФФИ 11-05-00212-а и гранта ДВО РАН 12-III-А-07-124.

Литература

1. Leigthon T.G. and White P.R. Quantification of undersea gas leaks from carbon capture and storage facilities, from pipelines and from methane seeps, by their acoustic emissions // J. Proc. R. Soc. A id: RSPA20110221. doi:10.1098/rspa.2011.0221.
2. Barbagelata A. & Barbagelata L. Method for detection fluid leaks from underwater pipelines // Patent WO 02/25239 A1, 22.09.2000.
3. Половинка Ю.А., Максимов А.О. Геоакустический комплекс пассивного обнаружения придонных газожидкостных потоков // Патент РФ № 129639 U1, БИПМ, 2013, № 18.
4. Половинка Ю.А., Максимов А.О. Метод пассивного акустического мониторинга придонных газожидкостных потоков // Заявка на изобретение №2013103963, приоритет от 29 января 2013г.

СИСТЕМА ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ

О. Г. Константинов, Е.А. Дюльдин

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН
690041 г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел (423)2374913
e-mail: olegkon@poi.dvo.ru

Современные комплексы дистанционного зондирования океана, вне зависимости от их теоретических основ и технической реализации, являются мощными измерительными инструментами, дополняющими и развивающими друг друга. Оценка изменчивости после взаимодействия со средой параметров зондирующих сигналов (акустических, электромагнитных) дает возможность получать хорошо калиброванную количественную информацию о состоянии природного объекта. Одна из таких систем -комплекс видеонаблюдения - разработана и активно развивается в Тихоокеанском океанологическом институте. Все процессы видеонаблюдения автоматизированы, созданы оригинальные методики и алгоритмы архивации и глубокой обработки данных

В течение 10 лет в ТОИ ДВО РАН Константиновым О.Г. создан и развивается комплекс видеонаблюдения, который в полной мере можно рассматривать как информационную систему нового поколения, позволяющую получать надежную объемную информацию о морской поверхности (МП). Аппаратная часть комплекса установлена на морской экспериментальной станции Тихоокеанского океанологического института (ТОИ) ДВО РАН на мысе Шульца на берегу бухты Витязь (МЭС м. Шульца). Несколько приборных комплексов регистрируют разные наборы исходных данных. Для каждого приборного комплекса создана система программного управления аппаратурой, регистрации, архивации исходных данных и передачи их в интегрированную информационную систему ТОИ ДВО РАН. Автоматизирован процесс первичной (выборка и фильтрация нужных массивов) и тематической (выделение структур и объектов МП) обработки данных наблюдения. Константиновым О.Г. разработаны и реализованы алгоритмы современных методов обработки и распознавания изображений. Использование Интернет – технологий и систем удаленного доступа позволяет управлять аппаратурой и процессом регистрации данных практически из любой точки.

Приборные комплексы и методы регистрации данных

Панорамная поляризационная видеосистема. Приборная база состоит из безкорпусной видеокамеры в термостабилизированном защитном корпусе, установленном на оси шагового двигателя [1]. Применение шагового двигателя с программным управлением позволяет использовать метод дискретного углового позиционирования видеосистемы. Для каждого кадра известны пространственная ориентация видеосистемы и высота расположения камеры, что позволяет трансформировать панорамное изображение на уровенную поверхность моря. Угловое разрешение видеосистемы рассчитывается по известному размеру пикселя матрицы и фокусному расстоянию объектива. Для привязки к географическим координатам используются реперные точки на изображении береговой черты. На рис. 1а приведен фрагмент панорамы бухты Витязь. Видеосистема располагалась на высоте 92 метра над уровнем, сектор обзора 270^0. Стрелками указаны области с повышенным мелкомасштабным волнением – так называемые «кошачьи лапки». На временной последовательности снимков МП они проявляются в виде темных полос,

перемещающихся по направлению турбулентных воздушных потоков. На рис. 1б приведен результат преобразования фрагмента панорамы с привязкой изображения морской акватории к географическим координатам.

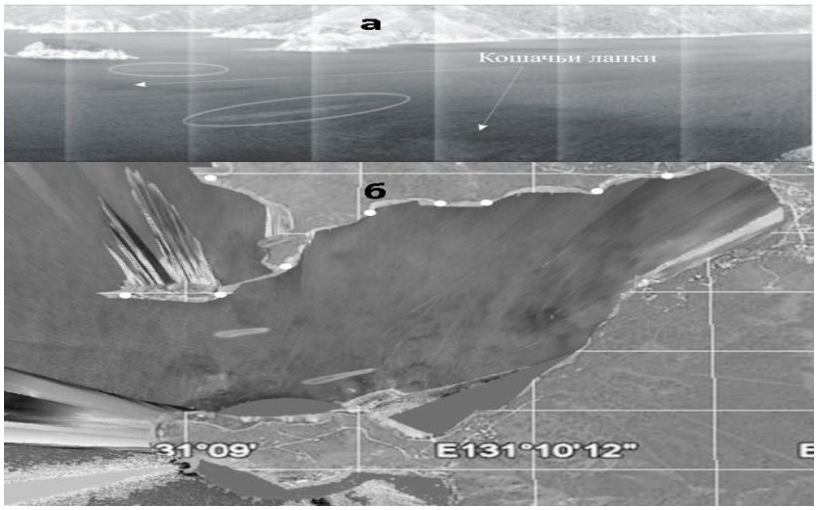


Рис.1. а - фрагмент панорамы бухты Витязь; б - изображение морской акватории с привязкой к географическим координатам.

Поляризационная видеосистема регистрации характеристик морского волнения. В состав комплекса входит поляризационная камера, система поплавков и программно реализованная методика определения высот и пространственно-временных характеристик уклонов элементов МП [2]. Одновременное измерение трех поляризационных компонент восходящего излучения в спектральной области, где вклад диффузной компоненты несущественен, дает возможность определить угол ориентации плоскости отражения, угол отражения и пространственную ориентацию отражающего элемента МП. Система поплавков позволяет получить реальные значения высот и уклонов элементов МП для калибровки поляризационных измерений.

Методы и алгоритмы тематической обработки видеоданных

Область МП с пониженным мелкомасштабным ветровым волнением называют сликом. Гашение мелкомасштабного морского волнения обусловлено различными явлениями: поверхностно-активными веществами (ПАВ); поверхностным проявлением внутренних волн; атмосферной циркуляцией; зоной распреснения морских вод прибрежными стоками, градиентами потоков водных масс [3]. Выглаживание МП приводит к увеличению доли зеркальной-отраженной компоненты восходящего излучения, что вызывает цветовой и яркостной контраст сликовых областей по отношению к чистой МП.

«Разностный» метод. «Разностное» изображение морской поверхности, полученное путем попиксельной разности яркости двух изображений, позволяет оценить изменение площади слика за определенный интервал времени . На рисунке 2а,б приведены изображения МП, выполненные с интервалом в 1 час. Белой линией обозначен маршрут судна. Сравнение площадей сликов по изображению 2в показывает, что за 1 час площадь загрязненной МП, по крайней мере, удвоилась. Контраст между сликом, образованным масляной пленкой, и «чистой» водной поверхностью зависит не только от свойств масляной пленки, но и от состояния морской поверхности, которое определяется в основном скоростью ветра. По изменению местоположения реперных объектов за известный межкадровый период

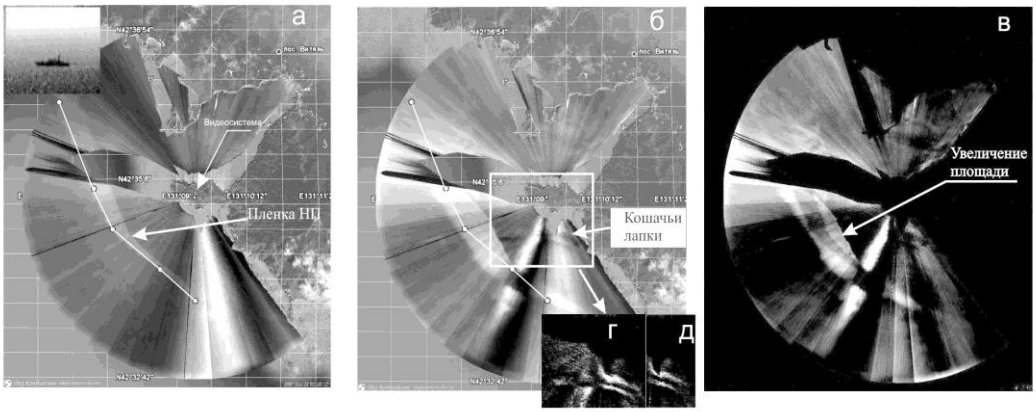


Рис. 2. Регистрация загрязнения 21.10.2007 и результаты обработки

может быть выполнена оценка скорости ветра. Для расчета перемещения реперных объектов используется техника корреляционного анализа двух «разностных» изображений, позволяющая по корреляционной матрице определить направление и сдвиг изображения объекта. Сопоставление расчетных данных и данных метеостанции показали, что при скорости ветра от 3 до 7 м/с погрешность измерений средних скоростей приводного ветра не превышает 10%. На рис.3 приведены результаты восстановления поля ветра при юго-западном (рис. 3а) и северо-западном (рис. 3б) ветре.

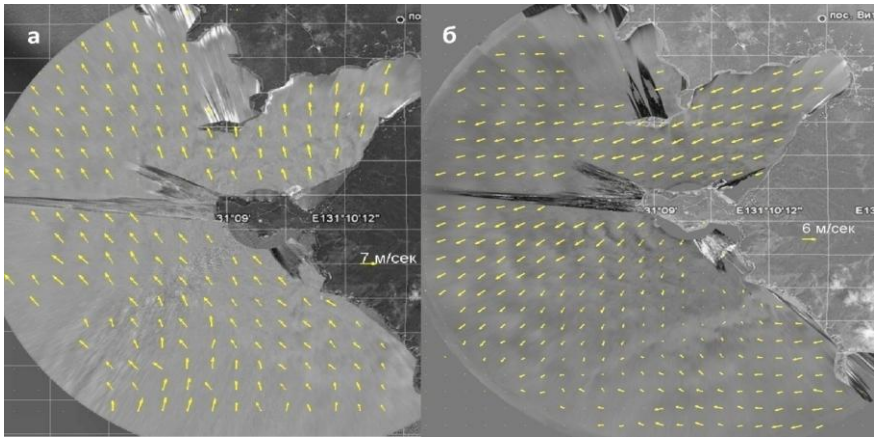


Рис. 3. Результаты восстановления поля ветра над поверхностью моря:
а - при юго-западном ветре, б – при северо-западном ветре.

Maximum Cross Correlation method (MCC) Метод MCC задает алгоритм оценки скоростей течений по перемещению температурных и оптических неоднородностей на последовательных изображениях МП [4,5]. Изображение разбивается на фрагменты и на последующем кадре, методами корреляционного анализа двухмерных изображений ищется подобный по текстуре фрагмент МП. В качестве критерия подобия фрагментов используется величина коэффициента кросс-корреляции. В программу обработки включены процедуры фильтрации данных и детализации полей скорости. На рисунке 4а приведены результаты применения метода MCC для восстановления поля скоростей двух мелкомасштабных вихрей: циклонического (справа вверху) и антициклонического (слева внизу). Для сопоставления величин скоростей потоков с их векторными изображениями, на диаграмме рисунка 4в приведено распределение скоростей в теле каждого вихря.

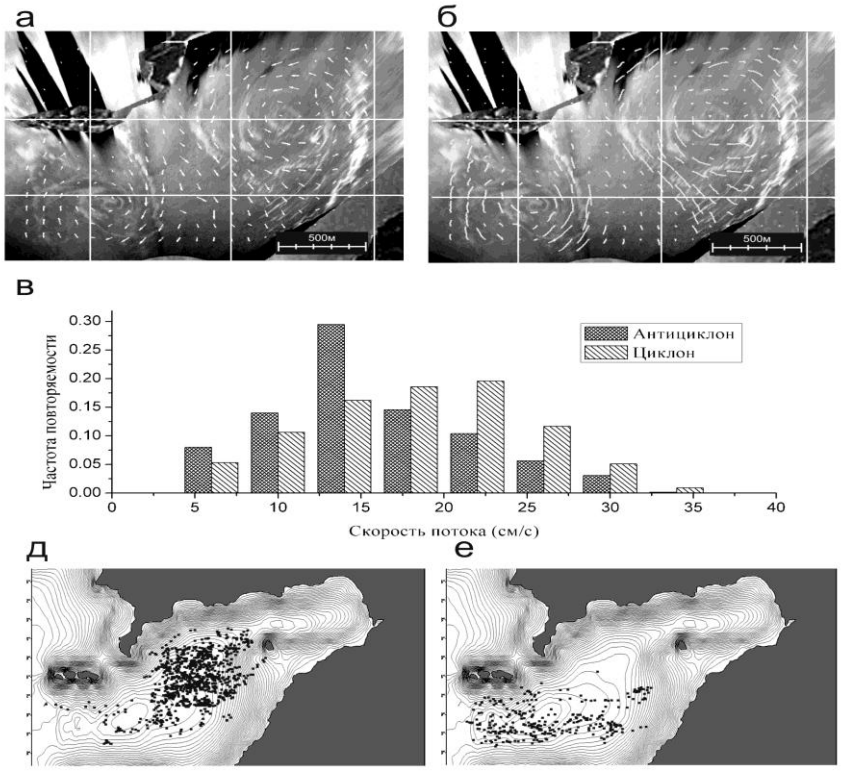


Рис.4 Результаты применения метода максимальной кросс-корреляции (МСС):
а – поле скоростей в теле вихрей; б – траектории перемещения; в – диаграмма распределения величин скоростей потоков в вихрях; д,е – местоположения центров циклонических и антициклонических вихрей за период наблюдения с 2006 по 2011 годы.

Основные направления исследований

Экологический мониторинг. Регистрация загрязнений морской поверхности. Характерным проявлением загрязнения МП являются слики [6], образующиеся из-за изменения коэффициента натяжения МП пленками поверхностно активных веществ (ПАВ). Выделить из всех структур на изображении МП сликовые области, обусловленные именно ПАВ, можно по эволюции их формы с учетом течений и характеристик ветра (см. Рис.1). **Изучение динамики мелкомасштабных вихрей.** Исследование механизмов образования и динамики вихревых структур, как основного элемента циркуляции вод – одна из центральных задач гидрофизики [7]. Наименее изучены на сегодняшний день вихри малых масштабов (1-10 км). Спонтанность возникновения, нестационарность, малое время жизни затрудняют их исследование традиционными методами или с помощью спутникового визирования. Основной способ регистрации мелкомасштабных вихрей в прибрежной зоне – видеонаблюдение, которое можно вести практически непрерывно в дневное время и с высоким пространственным разрешением изображений. Оптический мониторинг МП панорамной поляризационной видеосистемой позволил определить наиболее вероятное местоположение центров зарождения циклонических и антициклонических вихрей (рис.4д,е), зарегистрированных в бухте Витязь в период с 2006 по 2011г.

Поверхностные проявления внутренних волн. В результате многолетних видеонаблюдений, проводимых на МЭС «м. Шульц» удалось зафиксировать ряд уникальных явлений преобразования внутренних гравитационных волн (ВГВ) при выходе на мелководье, взаимодействия ВГВ с поверхностным ветровым волнением, передачу энергии и импульса ВГВ вихревой структуре. Возможности поляризационной видеосистемы позволяют рассчитывать количественные характеристики, что необходимо для создания новых, более точных физических и математических моделей этих процессов.

Литература

1. Кульчин Ю.Н., Букин О.А., Константинов О.Г., Вознесенский С.С., Павлов А.Н., Гамаюнов Е.Л., Майор А.Ю., Столярчук С.Ю., Коротенко А.А., Попик А.Ю. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Часть1. Концепция построения многоуровневых измерительных систем для экологического мониторинга прибрежных акваторий // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 633-637.

2. Константинов О.Г., Павлов А.Н. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Часть2. Регистрация загрязнений на морской поверхности // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 902-908

3. Константинов О.Г., Павлов А.Н. Комплексный контроль состояния морских акваторий оптическими методами. Часть3. Регистрация динамических процессов по сликам на морской поверхности //Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 01. С. 32-39

4. Emery W.J., Thomas A.C., Collins M.J., Crawford W.R., Mackas D.L. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images - J. Geophys. Res. C. (1986). V. 91, № 11. P. 12865-12878

5. Bowen M.M., Emery W.J., Wilken J., Tildesley P.C., Barton I.J., Extracting multi-year surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross correlation technique - J. Atmos. Ocean. Technol. (2002) V. 19, N 10. P. 1665-1676.

6. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. "Горячие точки" в поле внутренних волн в океане - Акуст. ж. 2007. Т. 53, № 3. С. 410-436.

7. Da Silva J.C., Ermakov S.A., Robinson I.S. The role of surface films in SAR signatures of internal waves on the shelf. III. Mode transition - J. Geophys. Res. C. 2000. V. 105, N 10. P. 24089-24104.

МАСКИРОВКА ОТ АКУСТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ ПУТЕМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ВЫБОРА ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА

А.В. Байдин, В.В. Соснов

Дальневосточный федеральный университет.
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, тел /факс: (423)2652429,
e-mail: thulf.m@gmail.com, megachuhancer@gmail.com

Рассматривается задача управления для двумерного уравнения Гельмгольца в неограниченной области с покрытой специальными материалами границей. Внесение покрытия моделируется с помощью импедансного граничного условия. Роль управления в рассматриваемой задаче играет поверхностный импеданс. Доказано существование решения задачи управления и выведена система оптимальности. Проведены численные эксперименты.

Введение

В настоящее время большое количество работ посвящается исследованию задач математической физики, связанных с созданием средств маскировки материальных объектов от электромагнитной или акустической локации. В ряде работ (см., например, [1, 2] и ссылки к этим работам) эффект маскировки обеспечивается выбором параметров неоднородной анизотропной среды, заполняющей маскировочную оболочку, путём решения соответствующей обратной задачи для уравнений Максвелла или уравнения Гельмгольца с переменными коэффициентами. Однако техническая реализация данного способа маскировки связана со значительными техническими трудностями [3].

Возможны несколько способов преодоления этих трудностей. Один из способов заключается в аппроксимации точных решений исследуемой задачи маскировки приближенными решениями, которые допускают относительно простую техническую реализацию. Другой альтернативный способ маскировки заключается в покрытии маскируемых материальных объектов специальными материалами. Внесение такого покрытия моделируется введением импедансного граничного условия, связывающего между собой звуковое давление и нормальную компоненту колебательной скорости через граничный коэффициент, называемый поверхностным импедансом. Математически, это – задача управления, заключающаяся в нахождении поверхностного импеданса, при котором поле, рассеянное маскируемым объектом, минимально. В данной работе рассматривается эта задача в двумерном случае с импедансным граничным условием на всей границе рассматриваемой области. Физические основы данного подхода можно найти в [4, 5].

1. Прямая задача

Пусть $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ – ограниченная односвязная область с липшицевой границей Γ, $\Omega^c \equiv \mathbb{R}^2 \setminus \overline{\Omega}$, n – нормальный вектор, ориентированный наружу, определенный почти всюду на Γ. Хорошо известно, что двумерная прямая задача рассеяния акустических волн описывается двумерным уравнением Гельмгольца

$$\Delta u + k^2 u = 0 \text{ в } \Omega^c, \tag{1}$$

в данном случае с импедансным граничным условием, моделирующим покрытие границы области специальными материалами:

$$\frac{\partial u}{\partial n} + ik\lambda u = 0 \text{ на } \Gamma. \tag{2}$$

Здесь $u = u^{inc} + u^s$, где u^{inc} – падающая волна, u^s – рассеянная препятствием Ω волна, λ – поверхностный импеданс границы Γ , k – положительное волновое число. Кроме того,

рассеянная волна u^s должна удовлетворять условию излучения Зоммерфельда на бесконечности

$$\lim_{r\to\infty}\sqrt{r}\left(\frac{\partial u^s}{\partial r}-iku^s\right)=0. \tag{3}$$

Эта задача рассматривается в неограниченной области, поэтому она непригодна для численного решения. Далее будет показано, что эту задачу можно свести к эквивалентной задаче в ограниченной области.

Введём некоторые функциональные пространства, которые будут использоваться в дальнейшем. Введём круг B_R радиуса R, содержащий Ω, положим $\Omega_e=\Omega^c\cap B_R$. Ω_e – ограниченная область в $\mathbb{R}^2$ с границей $\partial\Omega_e=\Gamma\cup\Gamma_R$, где $\Gamma_R=\partial B_R$. Будем использовать обычное пространство Соболева $H^1(\Omega_e)$, состоящее из комплекснозначных или вещественнозначных скалярных функций, заданных в Ω_e, и пространства следов $H^{1/2}(\partial\Omega_e)$ и $H^{1/2}(\Gamma_0)$, где Γ_0 – часть $\partial\Omega_e$. Помимо $H^{1/2}(\Gamma_0)$ будем использовать его подпространство $H_0^{1/2}(\Gamma_0)$, состоящее из таких и только таких функций $v\in H^{1/2}(\Gamma_0)$, продолжение нулем $\tilde v$ которых на всю границу $\partial\Omega_e$ принадлежит $H^{1/2}(\partial\Omega_e)$. Обозначим через $H^{-1/2}(\Gamma_0)$ пространство $H_0^{1/2}(\Gamma_0)^*$, сопряжённое к $H_0^{1/2}(\Gamma_0)$. Нормы в пространствах $H^1(\Omega_e)$, $H^{1/2}(\Gamma_0)$ и $H^{-1/2}(\Gamma_0)$ обозначим через $||\cdot||_{1,\Omega_e}$, $||\cdot||_{1/2,\Gamma_0}$ и $||\cdot||_{-1/2,\Gamma_0}$. Пусть Q – произвольное подмножество в Ω_e. Скалярные произведения и нормы в $L^2(Q)$ будем обозначать через $(\cdot,\cdot)_Q$ и $||\cdot||_Q$ соответственно. В случае $Q=\Omega_e$ полагаем $||\cdot||_{\Omega_e}=||\cdot||$, $(\cdot,\cdot)_{\Omega_e}=(\cdot,\cdot)$. Скалярные произведения и нормы в $L^2(\Gamma_0)$ обозначим через $(\cdot,\cdot)_{\Gamma_0}$ и $||\cdot||_{\Gamma_0}$. Положим $L^\infty_{\lambda_0}(\Gamma)=\{\lambda\in L^\infty(\Gamma):\lambda(x)\ge\lambda_0 \text{ на } \Gamma\}$, $H^s_{\lambda_0}(\Gamma)=\{\lambda\in H^s(\Gamma):\lambda(x)\ge\lambda_0 \text{ на } \Gamma\}$.

Определим следующее подпространство в $H^1(\Omega_e)$: $H^1(\Delta,\Omega_e)=\{v:v\in H^1(\Omega_e),\ \Delta v\in L^2(\Omega_e)\}$, наделённое нормой

$$||v||^2_{H^1(\Delta,\Omega_e)}=||v||^2_{1,\Omega_e}+||\Delta v||^2.$$

Известно [6], что для любой функции $u\in H^1(\Delta,\Omega_e)$ существует первый след $\gamma_1 u:=\partial u/\partial n|_{\partial\Omega_e}\in H^{-1/2}(\partial\Omega_e)$ и сужение первого следа $\partial u/\partial n|_{\Gamma_R}\in H^{-1/2}(\Gamma_R)$. Для описания падающих полей введём пространство $\mathcal{H}^{inc}=\mathcal{H}^{inc}(\Omega_e):=\{v\in H^1(\Omega_e):\Delta v+k^2v=0$ в смысле распределений $\}$. Ясно, что $\mathcal{H}^{inc}\subset H^1(\Delta,\Omega_e)$. Поэтому для любого падающего поля $u^{inc}\in\mathcal{H}^{inc}$ существуют следы (нормальные компоненты) $\partial u^{inc}/\partial n$ и $\partial u^{inc}/\partial n|_{\Gamma_R}$. Более того, из теорем о следах следует, что справедливы следующие оценки:

$$||v||_\Gamma\le C_1||v||_{H^1(\Omega_e)},\ ||v||_{1/2,\Gamma_R}\le C_1||v||_{H^1(\Omega_e)}\ \forall v\in H^1(\Omega_e),$$
$$||\frac{\partial v}{\partial n}||_{-1/2,\Gamma_R}\le C_1||v||_{H^1(\Omega_e)}\ \forall v\in\mathcal{H}^{inc}. \tag{4}$$

Здесь и далее $C_1, C_2, ...$ обозначают константы, зависящие от Ω, R и, может быть, от k.

Известно [7, 8], что задача (1)–(3) может быть сведена к эквивалентной задаче, но рассматриваемой уже в ограниченной области $\Omega_e=\Omega^c\cap B_R$. С этой целью вводится отображение Дирихле-Неймана $T:H^{1/2}(\Gamma_R)\to H^{-1/2}(\Gamma_R)$. По определению оператор T отображает любую функцию $h\in H^{1/2}(\Gamma_R)$ в функцию $\partial\tilde u/\partial n\in H^{-1/2}(\Gamma_R)$, где $\tilde u$ решение внешней задачи Дирихле для оператора Гельмгольца $\Delta\tilde u+k^2\tilde u=0$ в $\Omega^c\setminus\overline{B}_R$ во внешности B_R с условием $\tilde u|_{\Gamma_R}=h$. Хорошо известно, что $T\in\mathcal{L}(H^{1/2}(\Gamma_R),H^{-1/2}(\Gamma_R))$, причём $||T||=||T||_{\mathcal{L}(H^{1/2}(\Gamma_R),H^{-1/2}(\Gamma_R))}\le C_2$ [9]. Задача (1)–(3), рассматриваемая в неограниченной области, эквивалентна задаче (1), (2), рассматриваемой в ограниченной области Ω_e при следующем граничном условии для рассеянного поля u^s на Γ_R:

$$\partial u^s/\partial n = Tu^s \text{ на } \Gamma_R. \tag{5}$$

Будем ссылаться на задачу (1), (2), (5) как на задачу 1.

Пусть $u^{inc} \in \mathcal{H}^{inc}$. Умножим уравнение (1) на функцию $\overline{\phi}$, где $\phi \in H^1(\Omega_e)$, проинтегрируем по Ω_e и применим формулу Грина. Учитывая граничные условия можно представить задачу 1 в виде:

$$a_\lambda(u,\phi) = \langle f,\phi\rangle \ \ \forall\phi \in H^1(\Omega_e), \quad \langle f,\phi\rangle = -\int_{\Gamma_R} Tu^{inc}\overline{\phi}d\sigma + \int_{\Gamma_R} \frac{\partial u^{inc}}{\partial n}\overline{\phi}d\sigma. \tag{6}$$

Здесь $a_\lambda(u,\phi) := a_0(u,\phi) + ik(\lambda u,\phi)_\Gamma$ где $a_\lambda(\cdot,\cdot)$ и $(\lambda\cdot,\cdot) : H^1(\Omega_e)\times H^1(\Omega_e) \to \mathbb{C}$ – полуторалинейные формы, определяемые формулами

$$a_0(u,\phi) := \int_{\Omega_e} \nabla u\cdot\nabla\overline{\phi}d\sigma - k^2\int_{\Omega_e} u\overline{\phi}d\sigma - \int_{\Gamma_R} Tu\overline{\phi}d\sigma, \ (\lambda u,\phi)_\Gamma := \int_\Gamma \lambda u\overline{\phi}d\sigma. \tag{7}$$

Назовём решение $u \in H^1(\Omega_e)$ задачи (6) слабым решением задачи 1.

Пусть $\lambda \in L^\infty_{\lambda_0}(\Gamma)$, $\lambda_0 > 0$. Используя классические теоремы о следах, теоремы вложения и (4) можно показать, что формы f и a_λ непрерывны на $H^1(\Omega_e)$ и справедливы оценки:

$$||f||_{H^1(\Omega_e)^*} \le C_3||u^{inc}||_{1,\Omega}, \ ||a_\lambda|| := ||a_\lambda||_{\mathcal{L}(H^1(\Omega_e),H^1(\Omega_e)^*)} \le C_4(1+||\lambda||_{L^\infty(\Gamma)}) \tag{8}$$

где $H^1(\Omega_e)^*$ – сопряжённое к $H^1(\Omega_e)$ пространство. Отметим, что полуторалинейная форма a_λ определяет линейный оператор $A_\lambda : H^1(\Omega_e)\to H^1(\Omega_e)^*$, действующий по формуле

$$\langle A_\lambda u,\phi\rangle := a_\lambda(u,\phi) \ \ \forall u \in H^1(\Omega_e), \ \phi \in H^1(\Omega_e), \tag{9}$$

Основываясь на свойствах формы a_λ и оценках (8), можно показать, что к задаче (6) применима альтернатива Фредгольма, и что оператор A_λ, определённый в (9), является изоморфизмом. Положим $\tilde{C}_\lambda = ||A_\lambda^{-1}||$, где $A_\lambda^{-1} : H^1(\Omega_e)^* \to H^1(\Omega_e)$ – обратный оператор для A_λ. Тогда из (8) следует

Теорема 1 *Пусть $\lambda \in L^\infty_{\lambda_0}(\Gamma)$, $\lambda_0 > 0$. Тогда:*

(1) оператор $A_\lambda : H^1(\Omega_e) \to H^1(\Omega_e)^*$, определённый в (9), является изоморфизмом;

(2) для любого падающего поля $u^{\text{inc}} \in \mathcal{H}^{\text{inc}}$ задача (6) имеет единственное решение $u \in H^1(\Omega_e)$, которое удовлетворяет оценке $||u||_{H^1(\Omega_e)} \le C_\lambda||u^{inc}||_{1,\Omega_e}$, $C_\lambda = C_3\tilde{C}_\lambda$.

2.Задача управления

Сформулируем теперь задачу управления. Роль управления в данной задаче играет импеданс λ, изменяющийся в некотором множестве K, а в качестве функционала стоимости, который нужно минимизировать, будем использовать один из следующих:

$$I_1(u) = \int_Q |u-u_d|^2dx, \ \ I_2(u) = \int_{\Gamma_r} |u-u_d|^2d\sigma. \tag{10}$$

Здесь и ниже $Q \subset \Omega_e$ – произвольная подобласть, Γ_r – граница круга B_r радиуса $r < R$, такого, что $\Omega \subset B_r$. Предположим, что выполняются условия:

(j) $\Gamma \in C^{1,1}$; $\mu_0 > 0$; $u^{inc} \in \mathcal{H}^{inc}$; $K \subset H^s_{\lambda_0}(\Gamma)$ – непустое выпуклое замкнутое множество, где $s > 1/2$, $\lambda_0 > 0$.

Отметим, что при $s > 1/2$ (если $\Gamma \in C^{1,1}$) имеет место непрерывное компактное вложение $H^s(\Gamma) \subset L^\infty(\Gamma)$. Это влечёт за собой следующие оценки:

$$||\lambda||_{L^\infty(\Gamma)} \le C_s||\lambda||_{s,\Gamma} \ \ \forall\lambda \in H^s(\Gamma), \ ||\lambda||_{s,\Gamma} := ||\lambda||_{H^s(\Gamma)}. \tag{11}$$

Здесь константа C_s зависит от s и Ω. Введём оператор $G : H^1(\Omega_e) \times K \times \mathcal{H}^{inc} \to H^1(\Omega_e)^*$ формулой $\langle G(u, \lambda, u^{inc}), \phi\rangle = a_\lambda(u, \phi) - \langle f, \phi\rangle$ и перепишем слабую формулировку (6) задачи 1 в виде уравнения $G(u, \lambda, u^{inc}) = 0$. Рассмотрим следующую задачу условной минимизации:

$$J(u, \lambda) = \frac{\mu_0}{2} I(u) + \frac{\mu_1}{2} ||\lambda||^2_{s,\Gamma} \to \inf, \;\; G(u, \lambda, u^{inc}) = 0, \; (u, \lambda) \in H^1(\Omega_e) \times K. \quad (12)$$

Здесь $I : H^1(\Omega_e) \to \mathbb{R}$ слабо полунепрерывный снизу функционал стоимости, μ_0, μ_1 – неотрицательные параметры, служащие для регулирования относительной важности каждого из слагаемых. Введём множество $Z_{ad} = \{(u, \lambda) \in H^1(\Omega_e) \times K : G(u, \lambda, u^{\text{inc}}) = 0, J(u, \lambda) < \infty\}$ допустимых пар для задачи (12). Справедлива следующая теорема существования решения задачи (12).

Теорема 2 *Пусть выполняются условия (j), $\mu_1 > 0$ или $\mu_1 \geq 0$ и K – ограниченное множество. Тогда задача управления (12) имеет по меньшей мере одно решение $(u, \lambda) \in H^1(\Omega_e) \times K$ для $I = I_j$, $j = 1, 2$.*

Следующий этап исследования задачи управления (12) заключается в выводе системы оптимальности, описывающей необходимые условия экстремума. Он осуществляется по схеме, описанной в [10] и приводит к следующей теореме.

Теорема 3 *Пусть при выполнении условий (j) пара $(\hat{u}, \hat{\lambda}) \in H^1(\Omega_e) \times K$ является решением задачи (12), где $I = I_j(u)$, $j = 1, 2$. Тогда существует единственный ненулевой множитель Лагранжа $p \in H^1(\Omega_e)$, который удовлетворяет уравнению Эйлера-Лагранжа*

$$a_0(\phi, p) + ik(\hat{\lambda}\phi, p)_\Gamma = -(\mu_0/2)\overline{\langle I'_u(\hat{u}), \phi\rangle} \; \forall \phi \in H^1(\Omega_e) \quad (13)$$

и вариационному неравенству:

$$\mu_1(\hat{\lambda}, \lambda - \hat{\lambda})_{s,\Gamma} + \mathrm{Re}[ik((\lambda - \hat{\lambda})\hat{u}, p)_\Gamma] \geq 0 \;\; \forall \lambda \in H^1(\Omega_e). \quad (14)$$

Слабая формулировка задачи 1 (6), уравнение Эйлера-Лагранжа (13) и принцип минимума (14) представляют собой систему оптимальности. Система оптимальности может быть использована для исследования единственности и устойчивости решений конкретных задач управления, а также для построения численных алгоритмов. Простейший алгоритм можно получить, применив метод простой итерации. Он заключается в последовательном нахождении u_n, p_n, λ_{n+1} при известном λ_n путем последовательного решения следующих уравнений:

$$a_{\lambda_n}(u_n, \phi) = \langle f, \phi\rangle \;\; \forall \phi \in H^1(\Omega_e), \quad (15)$$

$$a_0(\phi, p_n) + ik(\lambda_n \phi, p_n)_\Gamma = -(\mu_0/2)\overline{\langle I'_u(u_n), \phi\rangle} \; \forall \phi \in H^1(\Omega_e), \quad (16)$$

$$\mu_1(\lambda_{n+1}, \lambda - \lambda_{n+1})_{s,\Gamma} + \mathrm{Re}[ik((\lambda - \lambda_{n+1})u_n, p_n)_\Gamma] \geq 0 \;\; \forall \lambda \in H^1(\Omega_e). \quad (17)$$

Заключение

В работе исследована задача управления для двумерного уравнения Гельмгольца с импедансным граничным условием. Она заключается в нахождении такого поверхностного импеданса, при котором поле, рассеянное препятствием, минимально. Доказана теорема существования решения этой задачи управления, выведена система оптимальности. Исследованию единственности и устойчивости решений задачи управления, а также анализу численных экспериментов будет посвящена отдельная работа авторов.

Литература

1. Алексеев Г.В., Романов В.Г. Об одном классе нерассеивающих акустических оболочек для модели анизотропной акустики // Сиб. журн. индустр. матем. 2011. Т. 14, № 2. С. 1–6.
2. Cummer S.A., Popa B.I., Schurig D. et al. Scattering theory derivation of a 3D acoustic cloaking shell // Phys. Rev. Letters. 2008. V. 100, P. 024301.
3. Дубинов А.Е., Мытарева Л.А. Маскировка материальных тел методом волнового обтекания // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 475–501.
4. Бобровницкий Ю.И. Научные основы акустического стелса // ДАН. 2012. Т. 442, № 1. С. 41–44.
5. Бобровницкий Ю.И., Морозов К.Д., Томилина Т.М. Периодическая поверхностная структура с экстремальными акустическими свойствами // Акустический журнал. 2010. Т.56. №2. С.147-151.
6. V. Girault and P.A. Raviart. Finite element methods for Navier-Stokes equations. Theory and algorithms. Springer-Verlag, Berlin, 1986.
7. Алексеев Г.В. Оптимизация в задачах маскировки материальных тел методом волнового обтекания // ДАН. 2013. Т. 449, №6, С. 1-5.
8. Alekseev G.V. Cloaking via impedance boundary condition for the 2-D Helmholtz equation // Applicable Analysis, 2013
9. D. Colton and R. Kress. Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory, Springer-Verlag, Berlin, 1998. Мир, 1983. С. 177-277.
10. Алексеев Г.В. Оптимизация в стационарных задачах тепломассопереноса и магнитной гидродинамики, Научный мир, Москва, 2010.

ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ АНТЕННЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ИЗЛУЧАЮЩИМИ СТРУКТУРАМИ ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОПЕРЕЧНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ СЛОЕВ

Ю.В. Мальцев, С.Е. Прокопчик

Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, тел.: (423) 2515325
e-mail: w120653m@gmail.com

Рассматриваются результаты исследования особенностей распространения продольных нормальных волн в цилиндрическом волноводе из слоистого композиционного материала с поперечной, относительно направления распространения волны, ориентацией слоев, основанные на асимптотическом подходе к определению эффективных акустических параметров мелкослоистой среды. Рассмотрено влияние объемных концентраций и акустических параметров компонентов на постоянные распространения нулевой продольной волны для двухкомпонентных композиционных материалов различного состава. Приведены численные расчеты дисперсионных кривых для различных композиционных материалов. Показана возможность получения существенного замедления фазовой скорости в подобных ортотропных композитах.

Эффективность применения различных гидроакустических систем во многом определяется параметрами гидроакустических антенн и в первую очередь их направленными свойствами. Как показали наши исследования, цилиндрические волноводные антенны можно эффективно использовать для создания осесимметричных направленных акустических полей различного вида /1/. Однако, возможность реализации антенн с заданными характеристиками напрямую зависит от наличия материалов для волноводных структур, с акустическими параметрами способными обеспечить требуемые характеристики. Круг известных однородных материалов, пригодных к использованию, довольно узок и это существенно ограничивает технические возможности волноводных антенн.

Перспективным направлением на наш взгляд является создание композиционных материалов, состоящих из двух и более однородных материалов или компонентов. Одним из вариантов подобных композитов являются материалы, состоящие из периодически чередующихся определенным образом сориентированных слоев материалов, обладающих различными акустическими свойствами. В таких материалах даже небольшие вариации свойств и концентрации гомогенных компонентов приводят к существенному изменению акустических параметров неоднородной композитной среды. Важным свойством таких слоистых композитов является их анизотропия, проявляющаяся в зависимости акустических параметров от ориентации слоев в акустическом поле.

Одним из наиболее важных вопросов при разработке волноводных преобразователей, является задача расчета постоянных распространения нормальных волн $\kappa_n = \kappa_{1n} + i\kappa_{2n}$. Как известно из теории волноводных антенн, вещественная часть волнового числа κ_{1n} задает распределение фазы на поверхности излучения волновода $\kappa_{1n} = \omega / C_{\varphi_n}$, где C_{φ_n} – фазовая скорость нормальной волны; ω – круговая частота и определяет угол выхода волны в окружающую жидкость. Величина мнимой части волнового числа κ_{2n} является радиационным коэффициентом затухания нормальной волны, связанным с излучением ее энергии в жидкость, и определяет распределение амплитуды возбуждения на излучающей поверхности волноводной структуры.

Таким образом, постоянные распространения нормальных волн, и прежде всего нулевой моды определяют направленность и другие параметры волноводных антенн /1/.

Определение постоянных распространения требует решения соответствующих граничных задач. Моделью цилиндрической излучающей структуры, может быть бесконечный упругий стержень, погруженный в жидкость /1/.

Анизотропные волноводные структуры требуют особого анализа. Основные затруднения связаны с необходимостью учета влияния как ориентации композита относительно направления распространения волны, так и геометрии волновода, его акустической нагруженности.

Проблемой распространения продольных нормальных волн в анизотропных цилиндрических волноводах, погруженных в жидкость, занимались многие авторы. В ряде работ исследовано распространение волн в поперечно изотропных цилиндрах, погруженных в жидкость, из гомогенных композитов или состоящих, например, из эпоксидных керамических матричных композитов, упрочненных тонкой металлической проволокой, или состоящих из изотропных ядра и произвольного числа оболочек /2-5/. Исследование постоянных распространения в цилиндрических волноводах с поперечной ориентацией слоев, погруженных в жидкость нам не известны.

Рассмотрим распространение продольных нормальных волн в композитном цилиндре, погруженном в жидкость, состоящем из чередующихся слоев двух изотропных сред, расположенных нормально к оси (рис.1).

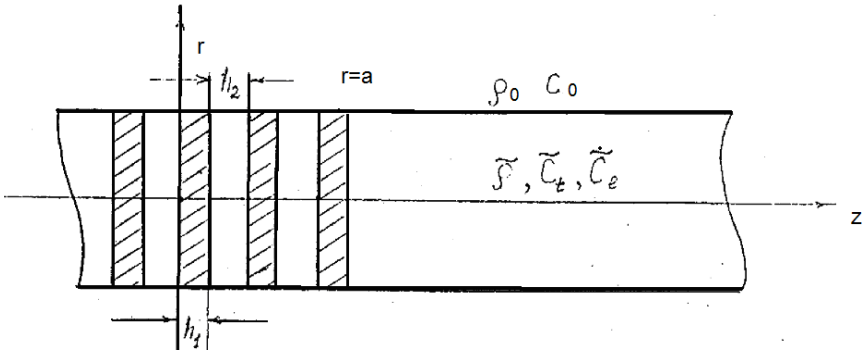


Рис.1. К расчету постоянных распространения мелкослоистых структур

Пусть толщины слоев h_1 и h_2 малы по сравнению с длинами продольных и поперечных волн в материалах, т.е. волновое поле слабо меняется на толщине отдельного слоя. Общая теория исследования акустических свойств композитных слоистых безграничных сред с периодической структурой подробно изложена в работе /6/.

Для описания упругости анизотропных материалов необходимо ввести больше, чем два независимых модуля упругости — обычно не менее пяти или шести. Эффективные упругие параметры слоистой периодической композитной среды определяются как для кристаллов гексагональной симметрии, т.е. среда характеризуется пятью упругими модулями. Определение этих модулей для мелкослоистых материалов с поперечной ориентацией слоев относительно направления распространения волны изложено в работе /6/. В данной работе решена задача по определению эффективных акустических параметров безграничной среды, состоящей из периодической системы слоев произвольной толщины. Асимптотические приближения, полученные для тонких слоев, позволяют обосновать модельную гипотезу эквивалентной гомогенности таких анизотропных безграничных сред и акустические свойства описать набором эффективных усредненных акустических параметров. Для случая периодического чередования двух тонких слоев с толщинами h_1 и h_2, можно записать следующие выражения для расчета эффективных параметров $\tilde{\rho}_{эф}$, $\tilde{C}_l$, $\tilde{C}_t$

$$\widetilde{C}_l^2 = \frac{h_1 + h_2}{\widetilde{\rho}_{эф}\left(h_1/(\lambda_1 + 2\mu_1) + h_2/(\lambda_2 + 2\mu_2)\right)}$$

$$\widetilde{C}_t^2 = \frac{h_1 + h_2}{\widetilde{\rho}_{эф}\left(h_1/\mu_1 + h_2/\mu_2\right)} \qquad (1)$$

$$\widetilde{\rho}_{эф} = \frac{h_1\rho_1 + h_2\rho_2}{h_1 + h_2} \quad ,$$

где $\widetilde{C}_l$, $\widetilde{C}_t$ - эффективные скорости продольных и поперечных волн соответственно, $\widetilde{\rho}_{эф}$ – эффективная плотность композита; ρ_1, ρ_2 – плотности материалов слоев; μ_1, μ_2, λ_1, λ_2 – постоянные Ламе для материалов слоев.

С учетом изложенного задача о распространении продольных нормальных волн в стержневом мелкослоистом волноводе сводится к решению граничной задачи для однородных стержней с эффективными параметрами $\widetilde{\rho}_{эф}$, $\widetilde{C}_l$, $\widetilde{C}_t$, вычисляемыми в соответствии с выражениями (1). Решение граничных задач для цилиндров со свободными границами и погруженных в жидкость дано в работе /1/. Постоянные распространения для продольных волн определяются, как корни соответствующих дисперсионных уравнений. Расчет корней дисперсионных уравнений для мелкослоистых волноводов различного состава производился методом Мюллера.

В качестве примеров на рис. 2 для двухкомпонентных композитных волноводов из эбонита-металла приведены кривые зависимости фазовой скорости C_φ от объемной концентрации металла в составе композита. Расчеты выполнены для тонких стержней со свободной границей, при малом значении частотного параметра, $\widetilde{x} = a\omega/\widetilde{C}_t$ =0.1. Объемное содержание металла в составе композита определяется относительной толщиной материала второго слоя $\widetilde{h}_2 = h_2/(h_1 + h_2)$.

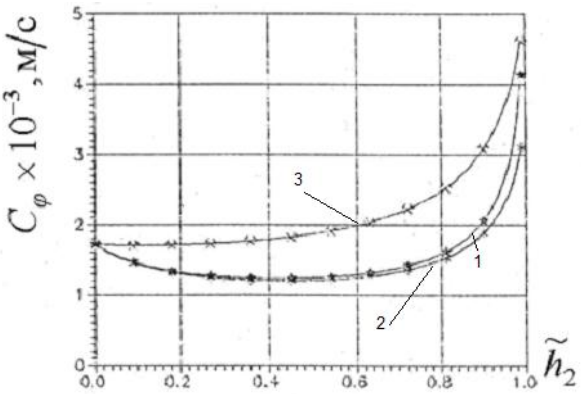


Рис. 2. Зависимость фазовой скорости для волновода из эбонита- металла от содержания металлов: 1- алюминий; 2- сталь; 3- латунь.

Как видно из анализа кривых, для $\widetilde{h}_2 \to 0$ и $\widetilde{h}_2 \to 1$, т.е. в случаях, когда стержень состоит только из эбонита или материала второго слоя, предельные значения фазовых скоростей равны стержневым скоростям в однородных стержнях из соответствующих материалов.

Полученный физически очевидный результат подтверждает правильность предложенной расчетной модели для мелкослоистого волновода. Для композитов

содержащих металлы с большой плотностью при определенных соотношениях толщин материалов слоев фазовая скорость минимизируется, становится ниже, чем стержневая скорость у наиболее медленного материала, входящего в состав. Можно использовать подобные композиты в качестве материалов тыльных накладок в конструкциях пьезопакетов, что даст возможность существенно сократить их общую длину на низких частотах, или в качестве фронтальных для согласования с нагрузкой.

На рис .3 представлены кривые дисперсионной зависимости фазовой скорости нулевой продольной моды для волноводов их эбонита-латуни со свободной поверхностью, и различным относительным содержанием латуни $\tilde{h}_2$.

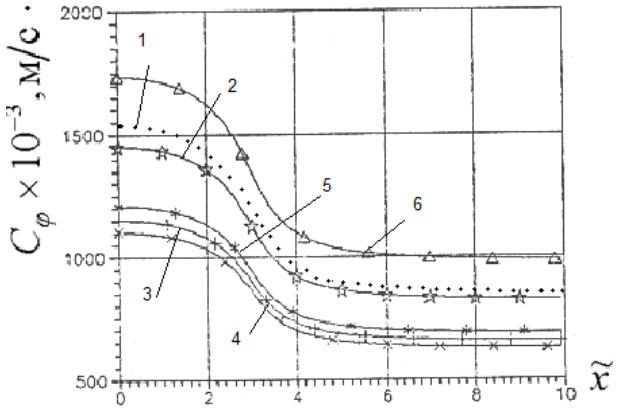


Рис.3. Дисперсионные кривые для свободного волновода из эбонита-латуни:
1- $\tilde{h}_2$ = 0,07; 2- $\tilde{h}_2$ =0,1; 3- $\tilde{h}_2$ =0,3; 4- $\tilde{h}_2$ =0,5; 5- $\tilde{h}_2$ =0,7; 6- $\tilde{h}_2$ =0,9

Как видно из графиков, с ростом частотного параметра $\tilde{x}$ фазовая скорость изменяется от стержневой скорости $C_\varphi = C_{ст}$ до скорости поверхностной волны Рэлея $C_R \approx (0.87 \div 0.96)\,\tilde{C}_t$, расчетные значения $\tilde{C}_t$ указаны в приведенной ниже таблице.

Эффективные параметры мелкослоистых цилиндрических волноводов из эбонита – латуни

$\tilde{h}_2$	$\tilde{\rho}_{эф}$, кг/м^3	$\tilde{C}t$, м/с	$\tilde{C}_l$, м/с	$C_{ст}$, м/с
1	2	3	4	5
0,1	1880.1	859.95	2002.85	1489.483
0.3	3274.39	735.05	1709.72	1273.146
0.5	4664.5	721.6	1674	1249
0.7	6051.83	799.53	1846.44	1384.82
0.9	7455.17	1138.39	2578.99	1891.76

Так же как и для волноводов из однородных материалов, дисперсия в области низких частот $\tilde{x} < 1.5$ и высоких $\tilde{x} > 4$ мала, а при средних значениях $1.5 < \tilde{x} < 4$ отмечается сильная зависимость от частотного параметра для любых относительных толщин слоев и всех рассчитанных нами сочетаний материалов в композите. Дисперсионные кривые для композитных волноводов отражают общие свойства дисперсии в цилиндрах со свободными границами из однородных материалов с акустическими параметрами, близкими к вычисленным эффективным параметрам, приведенным в таблице 1.

Анализ дисперсионного уравнения для цилиндров, погруженных в воду, показывает, что корни, соответствующие нулевой вещественной, распространяющейся в свободном цилиндре моде становятся комплексными. На рис.4 приведены примеры расчетов дисперсионной зависимости фазовой скорости мелкослоистого волновода из эбонита - латуни с различным объемным содержанием последней. Как можно видеть из кривых на

низких частотах фазовая скорость для всех случаев приближается к значению стержневой скорости, как и для свободного цилиндра. Нетрудно заметить, что дисперсионные кривые волноводов со свободными границами и погруженных в воду существенно отличаются для составов композитных материалов, относящихся к акустически мягким, т.е. имеющим сравнительно низкие значения эффективных параметров $\tilde{\rho}_{эф}$, $\tilde{C}_l$, $\tilde{C}_t$ (кривая 1). Аномальный характер дисперсионной зависимости качественно совпадает с картиной дисперсии для стержней из эбонита /1/.

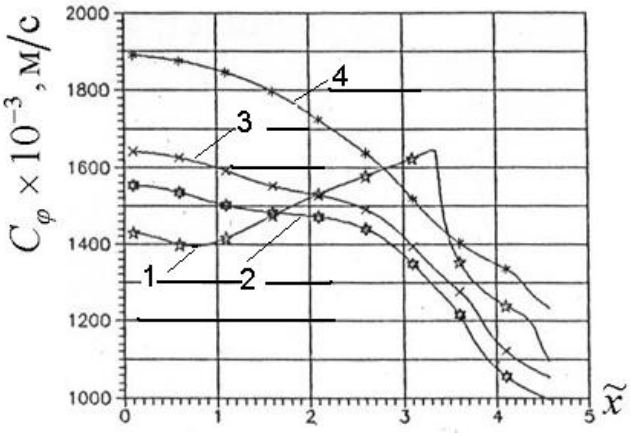


Рис. 4. Дисперсионные кривые для волновода из эбонита- латуни, погруженного в воду:
1- $\tilde{h}_2$ = 0,1; 2- $\tilde{h}_2$ =0,82; 3- $\tilde{h}_2$ =0,85; 4- $\tilde{h}_2$ =0,9

У композитных волноводов с большой плотностью (кривые 2-4) вещественная часть постоянной распространения изменяется слабо, что обусловлено более слабым влиянием жидкости. Как можно видеть из кривых на низких частотах фазовая скорость для всех случаев приближается к значению стержневой скорости, как и для свободного цилиндра, а на высоких частотах к скорости C_R поверхностной волны Рэлея. Мнимая часть волнового числа для композитных волноводов с большой плотностью (рис.5) существенно меньше, что обусловлено меньшим демпфирующим влиянием жидкости. Важно отметить, что для всех составов композитных материалов мнимая часть волнового числа отлична от нуля и в тех диапазонах частотного параметра, когда фазовая скорость распространения нулевой моды становится ниже, чем скорость звука в воде $C_\varphi < C_0$, но при таких условиях излучение энергии продольной волны в жидкость, прекращается. В этом случае, как показывает анализ кинематики для нулевой продольной нормальной волны, влияние жидкости приводит к изменению формы колебаний цилиндра, структуры продольной моды и происходит изменение характера движения в рассматриваемой системе волновод - жидкость. Различия обусловлены тем, что изменяется распределение смещений не только по толщине волновода, но и в жидкости, оно имеет экспоненциально убывающий от поверхности цилиндра характер. Волна как бы привязана к поверхности волновода и представляет собой аналог волны Стоунли-Шолте, но в отличие от нее затухает при распространении вдоль оси z.

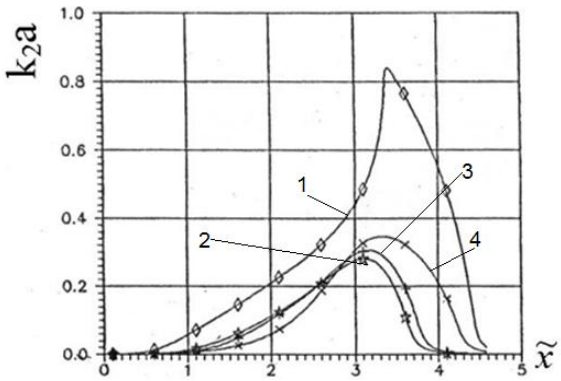


Рис. 5. Мнимая часть постоянной распространения для волновода из эбонита- латуни, погруженного в воду: 1- $\tilde{h}_2 = 0{,}1$; 2- $\tilde{h}_2 = 0{,}82$; 3- $\tilde{h}_2 = 0{,}85$; 4- $\tilde{h}_2 = 0{,}9$

Таким образом, анализ постоянных распространения двухкомпонентных слоистых композитных волноводных структур различных составов позволяет, отметить их бесконечное многообразие, что позволит расширить технические возможности волноводных антенн. Например, одной из важных проблем разработки волноводных излучателей является создание условий узконаправленного осевого излучения, что требует замедления фазовой скорости рабочей волны до величины близкой к значению c_0, что в принципе обеспечивается волноводными структурами из некоторых акустически мягких однородных материалов, таких как эбонит и другие. Однако, при их использовании формируются диаграммы направленности шириной более 50˚.

Для еще большей локализации осевого излучения нужны материалы, которые обеспечивают замедление фазовой скорости нормальной волны до значений 1510 -1550 м/с. Выше было показано, что это возможно осуществить с помощью композитных волноводных структур с поперечной ориентацией слоев.

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. Nagy Peter B. Longitudional guided wave propogation in a transversely isotropic rod immersed in fluid. // JASA, Vol.98 (1), 1995. pp. 454-457.
3. Berliner M.J., Solecki R. Wave propagation in fluid-loaded, transversely isotropic cylinders. Part I. Analytical formulation// JASA, Vol.99, No.4, 1996, pp. 1841-1847.
4. Berliner M.J., Solecki R. Wave propagation in fluid-loaded, transversely isotropic cylinders. Part II. Numerical results. // JASA, Vol.99, No.4, 1996, pp. 1848-1853
5. Dayal V. Longitudinal wave in homogeneous anisotropic cylindrical bars immersed in fluid. // JASA, Vol.93, 1993. pp. 1249-1255.
6. Рытов С.М. Акустические свойства мелкослоистой среды. Ак. ж., т. II, вып.1, 1956, с. 71-83.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ МОРСКОГО ЛЬДА ВБЛИЗИ НЕФТЕГАЗОВОГО СООРУЖЕНИЯ

К.Н. Куликов, С.В. Попов, Н.П. Гузанов, В.А. Иванова, Н.Г. Гарьянов, Д.С. Новиков

ОАО «НИПТБ «Онега».
164509, Архангельская область, г. Северодвинск, проезд Машиностроителей, 12,
тел./факс: (818-4) 52-55-52/(818-4) 52-45-39, e-mail: niptb@onegastar.ru

В докладе рассматриваются вопросы проектирования автоматической системы определения скорости изменения толщины морского льда вблизи нефтегазового сооружения, включающей в себя измерительные устройства толщины льда и промышленный компьютер со специализированным программным обеспечением.

В связи с активно ведущимся освоением углеводородных ресурсов Арктического шельфа, в настоящее время разработка новых конкурентоспособных отечественных систем мониторинга ледовой обстановки является актуальной задачей [1].

Обледенение металлоконструкций является одной из опасных проблем при эксплуатации нефтегазовых сооружений (далее – НГС) на Арктическом шельфе, поскольку может привести к созданию аварийных ситуаций – от потери устойчивости и вплоть до разрушения конструкций, остановки технологического процесса и загрязнения морской среды [2].

Разработанная ОАО «НИПТБ «Онега» в рамках Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники на 2009-2016 годы» автоматическая система определения скорости изменения толщины морского льда (далее – АС) осуществляет мониторинг толщины морского льда вблизи НГС в режиме реального времени. При этом, данные длительного мониторинга используются для прогнозирования скорости её изменения, что позволяет оценить возможность появления негативных последствий льдообразования в сходных метеорологических и гидрологических условиях.

Наиболее предпочтительным методом определения толщины морского льда для решения поставленной задачи по результатам сравнительного анализа является гидроакустический метод и эхоледомер в качестве прототипа измерительного устройства [3].

Принцип работы эхоледомера основан на периодическом излучении зондирующего ультразвукового импульса в сторону льда, приёма возникающих при отражении от его поверхностей эхосигналов и измерении времени прохождения сигналов.

Подключение измерительного устройства, разработанного на базе эхоледомера, к промышленному компьютеру (далее – ПК) со специализированным программным обеспечением (далее – ПО) позволит осуществлять определение скорости изменения толщины льда в режиме реального времени с достаточно высокой точностью, её визуальное отображение на экране за заданный период и хранение результатов в базе данных [4]. При этом данные длительного мониторинга скорости изменения толщины льда могут быть использованы для прогнозирования её динамики в сходных метеорологических и гидрологических условиях.

Разработанная АС для мониторинга НГС состоит из:

- измерительных устройств в количестве 13 шт., из которых 12 шт. устанавливается стационарно на дне в непосредственной близости НГС и равномерно по его периметру, а 1 шт. – на движущемся по заданной траектории подводном аппарате;
- ПК со специализированным ПО в количестве 1 шт., расположенного на борту НГС.

Передача информации от измерительных устройств в ПК осуществляется по защищённому от воздействия морской воды кабелю для интерфейса RS-485 в соответствии с

протоколом передачи данных, с той разницей, что от стационарно установленных на дне измерительных устройств информация передаётся непрерывно, а от измерительного устройства на подводном аппарате – по завершению его маршрута, при этом информация сохраняется на встроенном модуле flash-памяти.

В состав измерительного устройства входят следующие модули: блок питания, повышающий преобразователь, формирователь импульсов, пьезокерамический излучатель, приёмник эхосигналов, датчик давления, преобразователь сигнала датчика давления, вычислитель и модуль передачи данных.

Электрические принципиальные схемы модулей измерительного устройства АС приведены на рис. 1-5.

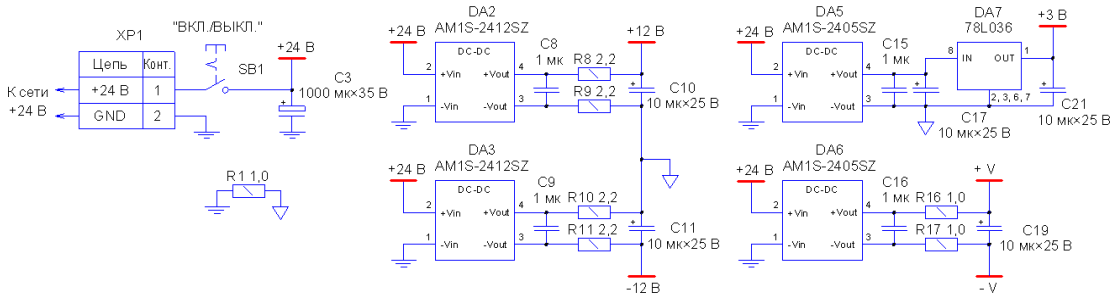


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема блока питания

Электропитание измерительного устройства АС осуществляется от источника постоянного напряжения 24 В, при этом такие модули как повышающий преобразователь и формирователь импульсов питаются от него напрямую, а остальные модули – от формирующего необходимые уровни постоянного напряжения блока питания.

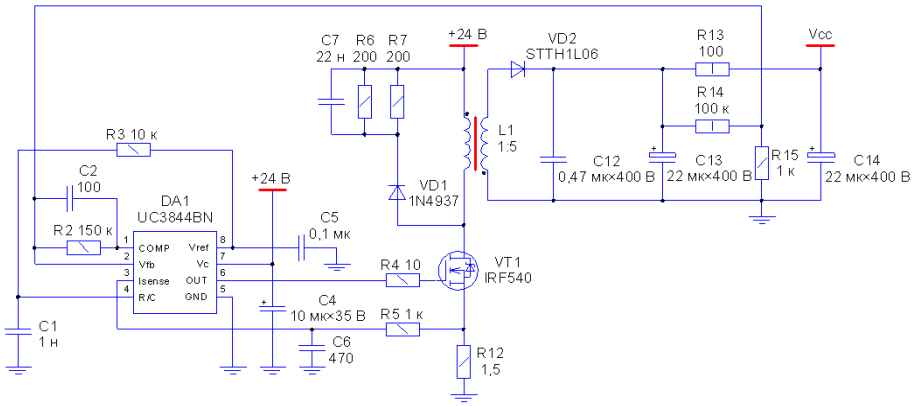
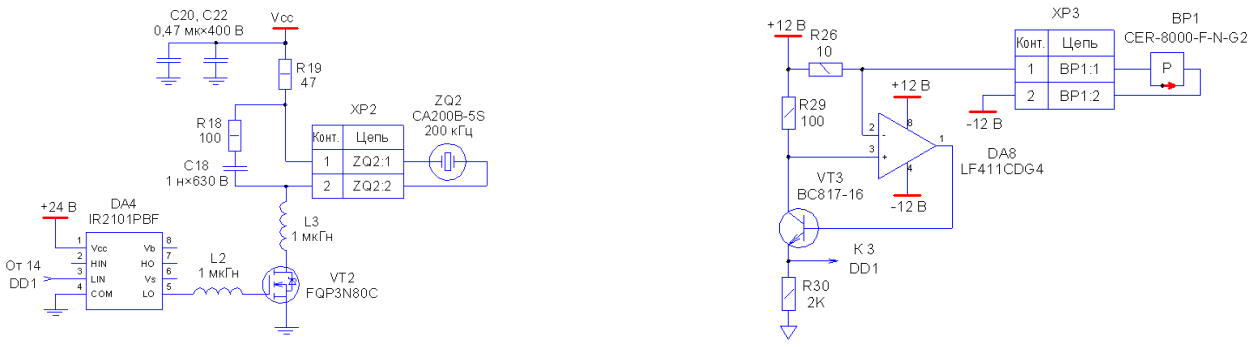


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема повышающего преобразователя

Повышающий преобразователь предназначен для получения напряжения Vcc значением от 200 до 400 В для питания формирователя импульсов. Поскольку отбор энергии с выхода повышающего преобразователя происходит в импульсном режиме, среднее значение его выходной мощности составляет порядка 5 Вт.



а б

Рис. 3. Электрическая принципиальная схема формирователя импульсов (а) и преобразователя сигнала датчика давления (б)

Формирователь импульсов предназначен для возбуждения зондирующего импульса в пьезокерамическом излучателе, электрического демпфирования выбросов его напряжения и обеспечения дальнейшей работы приёмника эхосигналов.

В результате расчётов было получено, что оптимальными для определения малых толщин льда с заданной точностью 5 % будут следующие параметры: эффективная длительность зондирующего импульса $\tau_И$ = 17 мкс и частота зондирующего сигнала f = 200 кГц, что не противоречит данным теоретических исследований [5]. В данном случае пьезокерамический излучатель возбуждается одиночным зондирующим импульсом, а его мощность варьируется за счёт изменения рабочего напряжения формирователя импульсов Vcc. При увеличении толщины льда становится возможным увеличить длительность зондирующего импульса до значений от 20 до 30 мкс, поэтому пьезокерамический излучатель возбуждается не одним, а двумя или тремя импульсами, при этом, за счёт электромеханического резонанса излучателя кратно увеличивается амплитуда зондирующего импульса.

Преобразователь сигналов датчика давления предназначен для преобразования выходного токового сигнала от 4 до 20 мА, 24 В (общепромышленный стандарт) датчика давления, установленного в непосредственной близости от пьезокерамического излучателя, в сигнал напряжения от 0,8 до 4 В для подачи в вычислитель и модуль передачи данных.

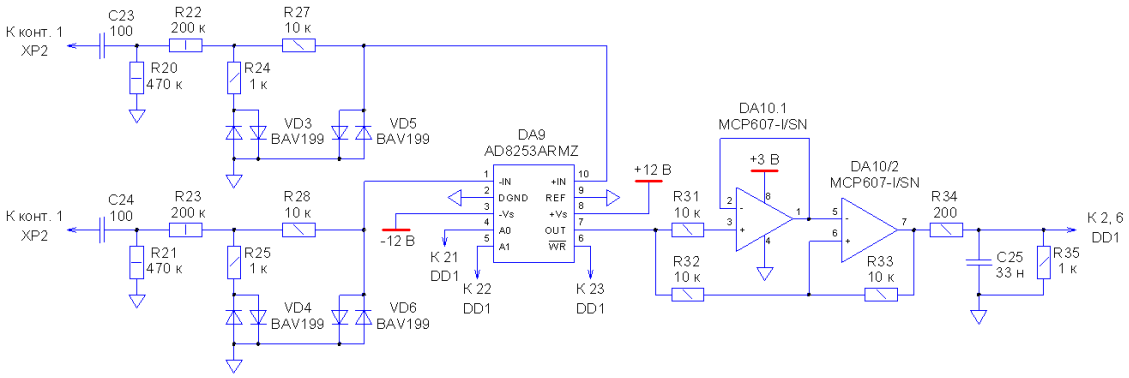


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема приёмника эхосигналов

Приёмник эхосигналов осуществляет эффективное усиление сигналов от пьезокерамического излучателя, являющегося, в данном случае, также приёмником отражённого сигнала.

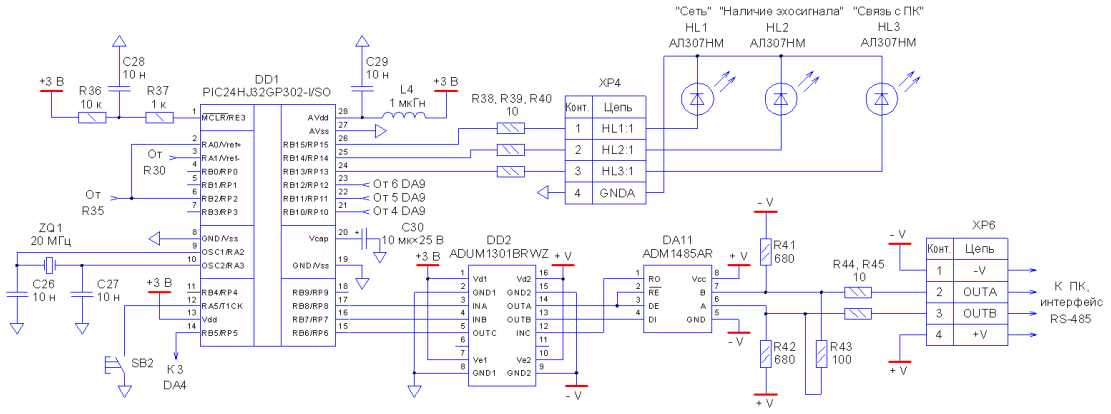


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема вычислителя и модуля передачи данных

Вычислитель и модуль передачи данных предназначен для обработки поступающих в него дискретных и аналоговых сигналов с достаточной для поставленной задачи точностью и скоростью, организации обмена данными с ПК и управления работой всей схемы в соответствии с заданным алгоритмом.

Основные технические характеристики измерительного устройства АС:

- электропитание от источника постоянного напряжения 24 В;
- средняя потребляемая мощность не более 5 Вт;
- измерение толщины льда из подводного положения с расстояния до нижней кромки льда от 3 до 50 м;
- толщина измеряемого льда в пределах от 0 до 1,5 м;
- погрешность измерений толщины льда и скорости его образования не более 5 %;
- частота излучателя CA200B-5S 200 кГц, телесный угол луча 8,5º;
- диапазон измерения датчика давления CER-8000-F-N-G2 от 0 до 1 МПа.

Для обработки, хранения и отображения информации, поступающей от измерительных устройств, в АС использован ПК со специально разработанным для этих целей ПО – «Программой визуального отображения скорости изменения толщины морского льда вблизи нефтегазового сооружения». Выбор типа ПК обусловлен минимальными техническими требованиями для установки данного ПО.

ПО позволяет:

- отобразить на экране ПК пространственную диаграмму толщины льда на территории, ограниченной радиусом 1 км от центра НГС, на основании информации, полученной от установленного на подводном аппарате измерительного устройства, а также приведённые на диаграмме данные в табличном виде и среднее значение скорости изменения толщины льда по полученным данным, как показано на рис. 6;
- отобразить на экране ПК графики зависимости толщины льда от времени на основании информации, полученной от установленных стационарно по периметру платформы измерительных устройств, а также приведённые на графиках данные в табличном виде и среднее значение скорости изменения толщины льда по полученным данным, как показано на рис. 7;
- обеспечить хранение обработанных данных для обеспечения возможности их дальнейшего просмотра за определённый временной промежуток.

По разработанной «Программе визуального отображения скорости изменения толщины морского льда вблизи нефтегазового сооружения» направлена заявка в ФГУ «ФИПС» на её государственную регистрацию.

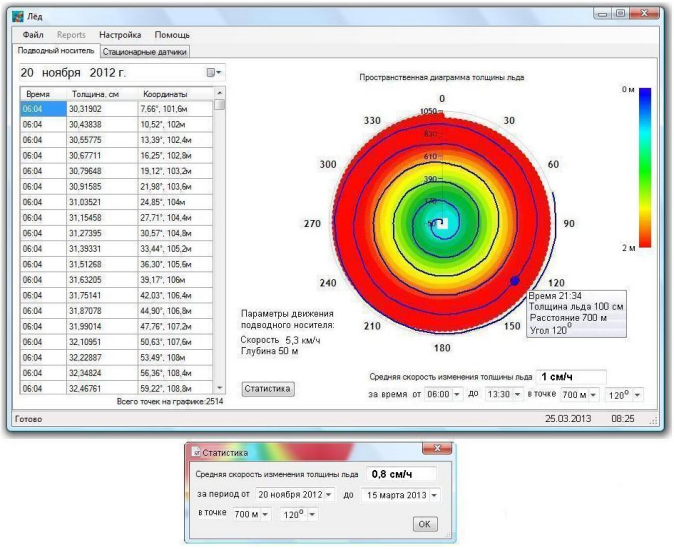


Рис. 6. Внешний вид главного окна ПО для работы с данными от измерительного устройства на подводном аппарате

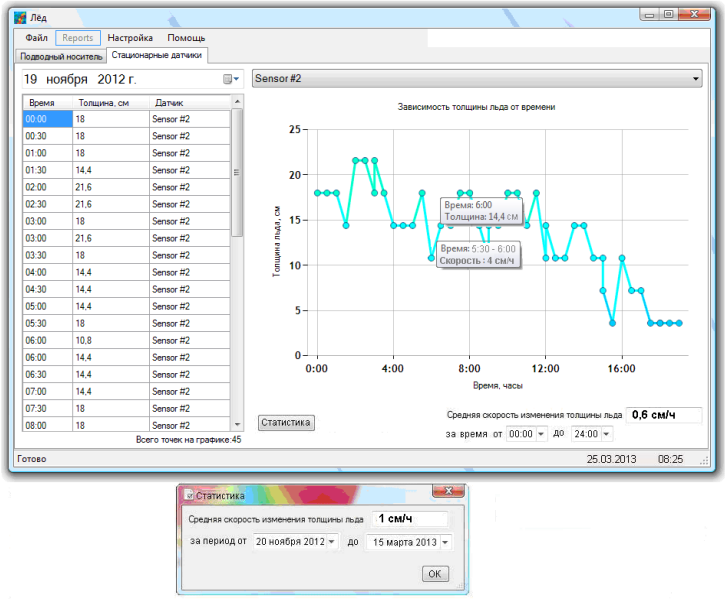


Рис. 7. Внешний вид главного окна ПО для работы с данными от стационарно установленных на дне измерительных устройств

Все модули измерительного устройства АС (кроме пьезокерамического излучателя и датчика давления) реализованы на двух печатных платах (питания и измерения), которые соединяются между собой переходными разъёмами. На плате питания реализованы блок питания и повышающий преобразователь, а также предусмотрен винтовой разъём для подключения внешнего источника питания 24 В. На плате измерения реализованы формирователь импульсов, приёмник эхосигналов, преобразователь сигнала датчика давления, вычислитель и модуль передачи данных, а также предусмотрены винтовые разъёмы для подключения пьезокерамического излучателя, датчика давления и кабеля для интерфейса RS-485.

Измерительное устройство АС предусматривает конструктивное исполнение в двух типах корпусов: для размещения на подводном аппарате, как показано на рис. 8, и для стационарного донного размещения, как показано на рис. 9.

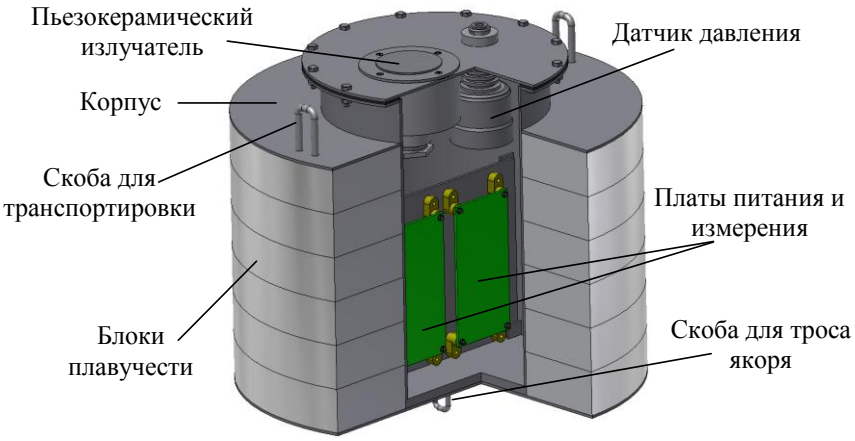


Рис. 8. Конструктивное исполнение измерительного устройства АС для стационарного донного размещения

В первом случае корпус измерительного устройства размещается внутри герметичного корпуса подводного аппарата, за пределы которого выводятся только рабочие поверхности пьезокерамического излучателя и датчика давления, во втором – измерительное устройство в сборе устанавливается на дне стационарно с помощью якоря и троса и находится в плавучем состоянии.

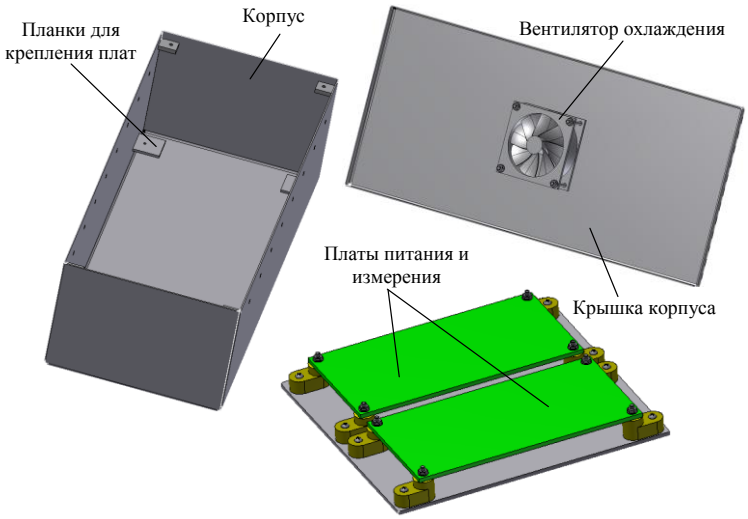


Рис. 9. Конструктивное исполнение измерительного устройства АС для размещения на подводном аппарате

В настоящее время ведутся работы по испытанию и наладке изготовленного по разработанной рабочей конструкторской документации опытного образца АС, после чего предстоят работы по натурным испытаниям системы в целом в составе диагностического комплекса НГС.

Основными потенциальными потребителями разработанной АС являются предприятия, изготавливающие и эксплуатирующие нефтегазовые сооружения разных типов (погружные, подъёмные, плавучие платформы) для освоения шельфа северных морей.

Предварительное рассмотрение суммы ущерба от последствий возможной аварии в результате воздействия ледовых полей на НГС позволяет сделать вывод, что сумма ущерба значительно перекрывает расходы на разработку и создание АС, обеспечивающей информацией о передвижениях ледовых полей.

Литература

1 Рудомёткин А. Арктика как важнейшее направление российской морской деятельности [Текст] / А. Рудомёткин, А. Нагорский // Морской сборник. – 2010. – № 8. – С. 64–69.

2 Глухов В. Г. К проблеме обледенения морских сооружений, предназначенных к работе в условиях шельфа Карского моря [Текст] / В. Г. Глухов // Морская технология. – 1998. – № 4. – С. 13–15.

3 Автоматическая система определения скорости изменения толщины морского льда [Текст] : пояснительная записка к техническим предложениям : ЯНМИ.0432.00.019ПТ / ОАО «НИПТБ «Онега» ; утв. Куликов К.Н. ; исполн.: Гарьянов Н. Г. [и др.]. – Северодвинск, 2011. – 96 с. – Библиогр.: с. 81–84. – Инв. № 97329.

4 Экспериментальная автоматическая система определения скорости изменения толщины морского льда в районе постановки нефтегазовых сооружений [Текст] : пояснительная записка : ЯНМИ.402223.003ПЗ / ОАО «НИПТБ «Онега» ; утв. Салыкин О.М. ; исполн.: Иванова В. А. [и др.]. – Северодвинск, 2012. – 28 с. – Библиогр.: с. 27. – Инв. № 99066.

5 Шестов, А. С. Математическое моделирование воздействия ледяных образований на дно Байдарацкой губы Карского моря [Текст] / А. С. Шестов, А. В. Марченко, С. А. Огородов // Труды Центрального научно-исследовательского института имени академика А. Н. Крылова. Выпуск 63 (347). – 2011. – № 5. – С. 105–118. – ISSN 0869-8422.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЛЯ ПРИЕМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С.И. Каменев

ТОИ ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Тел.: (423) 231-16-31, Факс: (423) 231-25-73
e-mail: kamenev@poi.dvo.ru

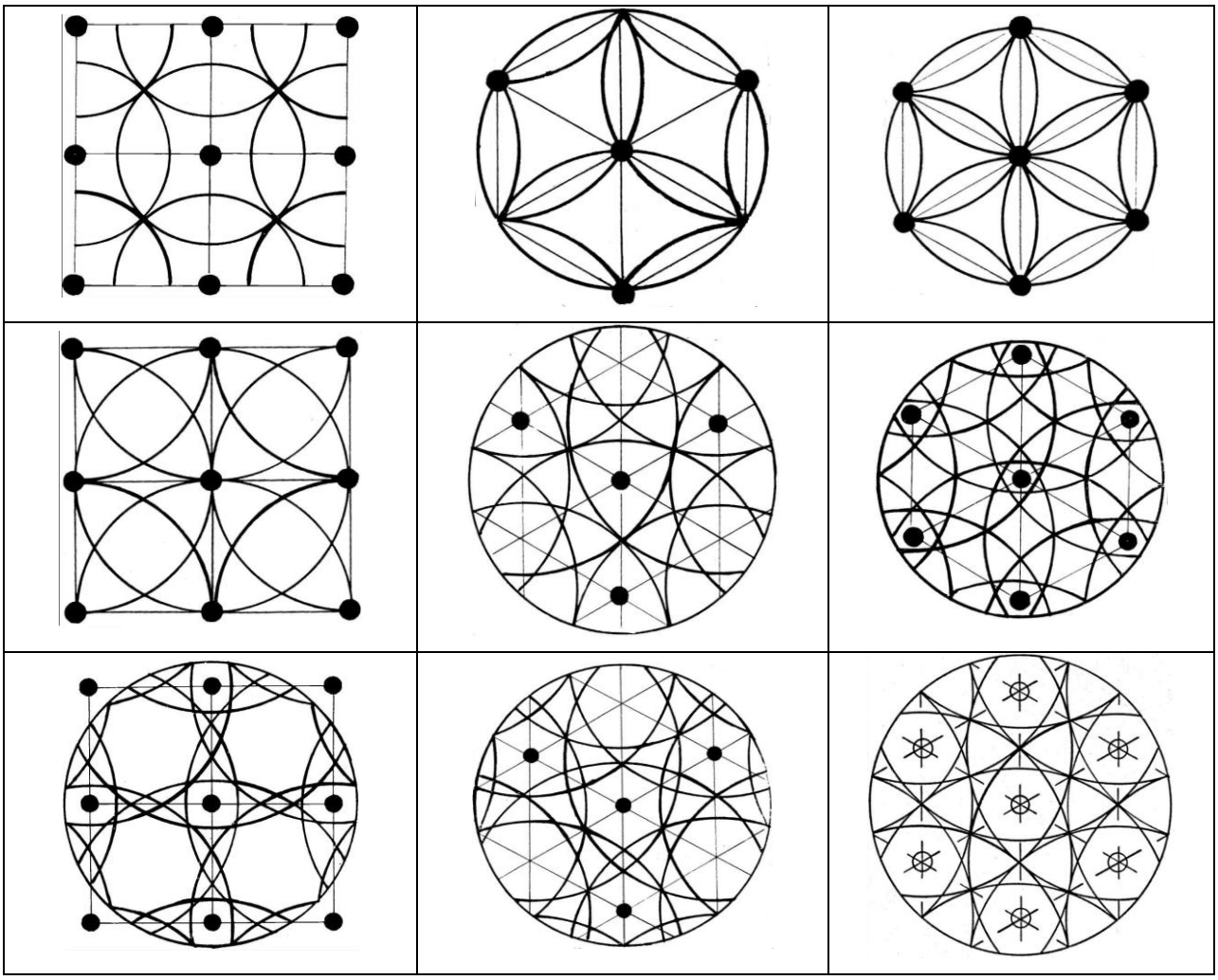
В рамках концепции сетецентризма рассматривается подход к построению оптимального поля размещаемых в акватории измерительного полигона приемников акустических сигналов.

Сетецентртическая концепция возникла в области ведения боевых действий и уже внедрена в армии США и внедряется в армиях России и в некоторых других государствах. Отличительной чертой сетецентрических информационно-управляющих систем специального назначения является их глобальность – как в пространственном, так и в функциональном плане. Они функционируют в режиме реального времени, в асинхронном (событийном) режиме работы. Сетецентрические системы изначально проектируются устойчивыми к глубоким частичным отказам узлов сети и линий связи [1],

При формировании поля приемных элементов гидроакустической компоненты сетецентрической системы, функционирующей в рамках измерительного гидроакустического полигона, будем руководствоваться теорией орнаментальной симметрии в горизонтальной плоскости, что позволит решать задачу оптимизации для элемента структуры и обобщать полученный результат на всю акваторию путем трансляции исходного элемента [2, 3]. Таким образом, для получения симметричной структуры достаточно задать совокупность элементов симметрии (осей и точек) на элементарном участке акватории. Перемещая точку, соответствующую исходному приемнику, относительно элементов симметрии, можно получить точки установки остальных приемников. Существует 24 группы орнаментов, семь из которых позволяют получить систему точек, распространяющуюся в направлении одной их осей в горизонтальной плоскости [3]. Для заполнения всей плоскости необходимо осуществить простой перенос (трансляцию) этой системы в направлении другой оси. С некоторыми ограничениями могут быть использованы и 17 других групп орнаментов, а также комбинации различных групп.

Мы ограничимся случаем, когда горизонтальные расстояния между приемниками одинаковые, а углы, в которых расположены приемники, равны между собой. В этом случае возможны три вида орнаментов, состоящих из правильных многоугольников: тригональная, тетрагональная и гексагональная – приемники будут находиться в вершинах равносторонних треугольников, квадратов и шестиугольников соответственно. Расположив приемники на одном горизонте, представим зону действия каждого из них в виде круга радиуса R, расстояние D между приемниками выберем наибольшее, но так, чтобы не появились области, не входящие в зону ни одного из приемников (рис.1, верхний ряд). Видно, что для всех систем характерно наличие областей, принадлежащих одновременно зонам одного или нескольких приемников, причем число приемников, связанных с этими областями, имеет явно выраженные максимум Pmax и минимум Pmin. Ясно также, что площадь S, приходящаяся на один приемник будет различной для различных систем установки при для заданных R, Pmax и Pmin. Естественно оценивать эффективность системы отношением S/R^2, так чтобы для покрытия заданной акватории потребовалось меньшее число приемников.

Степень, перекрытия зон Pmin является важнейшей характеристикой, характеризующей надежность и функциональность формируемой структуры при передаче измерительной, связной, дальномерной и др. информации на следующий уровень сетецентрической системы. Параметр Pmax имеет значение только, если существует ограничение на число каналов передачи информации. Сближение преемников приводит к изменению параметров структуры (рис. 1, средний и нижний ряды). При этом, если задано Pmin=4, то оптимальной в смысле выбранного критерия буде тетрагональная система.



а) б) в

Рис. 1. Тетрагональная (а), гексагональная (б) и тригональная (в) системы.

Рассмотрим более подробно случай Pmin=5. Здесь оптимальной в смысле выбранного критерия буде тригональная система (рис.1в, нижний ряд), которая характеризуется следующими параметрами: расстояние между приемниками $D=2R/\sqrt{7}$; имеются зоны, перекрываемые шестью и семью приемниками, соотношение площадей соответствующих зон от Pmin=5 до Pmax=7 приближенно равно {0 : 9 :4}; основным элементом структуры является триада приемников, в расчетах достаточно учитывать семь приемников в пределах зоны действия одного их приемников. Для описания работы компоненты применим теорию марковских процессов с непрерывным временем и дискретными состояниями [4, 5 ,6]. С этой целью составим граф состояний системы [7, 8], выделив состояния: «7»- объект находится в зоне, перекрываемой семью приемниками, «6»- объект находится в зоне, перекрываемой шестью приемниками, «5»- объект находится в зоне, перекрываемой пятью приемниками, «7-1»- объект находится в зоне, перекрываемой номинально семью приемниками, но один из

приемников вышел из строя и так далее до состояний «7-7», «6-6», «5-5» -всего 21 состояние. Полученный граф представляет собой вершины, сопоставленные выделенным состояниям, а ребра графа соответствуют направлениям перехода объекта из состояние в состояние. Следует отметить, что в силу очевидного предположения о непрерывности траектории движения объекта, на графе отсутствуют перекрестные связи.

Для анализа графа из 21 состояния в общем случае необходимо составить систему дифференциальных уравнений 21 порядка [9, 10]. С целью упрощения математического описания системы введем некоторые допущения. Во-первых, в силу малости площади, покрываемой пятью приемниками по сравнению с шестью и семью, пренебрежем состояниями вида «5-i». Во вторых, будем считать, что выход из строя более двух элементов за время функционирования системы невозможен, тогда можно пренебречь состояниями «7-i» и «5-i» при i >2. Обозначив через Pi/j вероятность того, что из j приемников, формирующих зону, i приемников выходят из строя, можно, при сделанных выше предположениях, получить редуцированных граф, показанный на рисунке 2, где выделены шесть состояний и показаны направления перехода из состояния в состояние. Вершины графа размечены: в вершинах указано среднее время пребывания системы в том или ином состоянии, на ребрах графа, соответствующих направлениям перехода из состояния в состояние, указаны интенсивности перехода. Все указанные характеристики можно рассчитать, задав вероятность P выхода из строя одного элемента структуры.

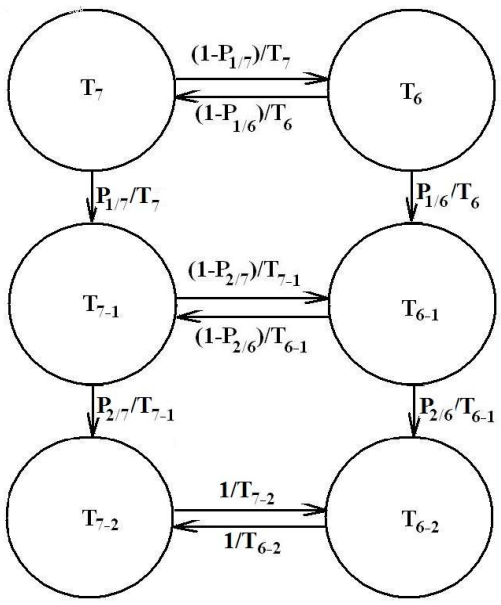


Рис. 2. Редуцированный граф состояний

При достаточно большом времени наблюдения t, можно считать, что в системе установился стационарный режим и ввести предельные вероятности, преобразовав систему из шести дифференциальных уравнений в систему линейных уравнений шестого порядка [9, 10], которое совместно с нормировочным условием

$$P_7 + P_{7-1} + P_{7-2} + P_6 + P_{6-1} + P_{6-2} = 1$$

дает решение для P_{6-2} и, следовательно, для предельного значения надежности:

$$q = 1 - P_{6-2}\,.$$

Зная зависимость q(t), можно определить такие характеристики, как среднее время безотказной работы, плотность и интенсивность отказов и другие, которые могут быть использованы при анализе сетецентрической системы, в которую рассмотренная система входит в качестве компоненты.

Следует отметить также, что концепция сетецентризма [1] предполагает наличие «интеллекта» у приемных элементов. Они могут «принимать» решение о перемещении, изменении чувствительности и др. Обычные здесь перегрузка и нелинейные эффекты могут быть дополнены «зависанием», самовозбуждением – эффектами, характерными для сложных систем. Сетецентристы фантазируют, что большое количество однородных элементов с «интеллектом» может выйти на новый качественный уровень, не предусмотренный разработчиками, как, например, отдельные насекомые, объединяясь в рой, ведут себя совсем иначе, чем индивидуумы.

Таким образом, применение описанного подхода к формированию оптимальной структуры поля приемных элементов и использование методов аналитического исследования систем, позволяет получить важные практические результаты по определению взаимного пространственного расположения акустических приемников, покрываемой ими площади акватории, надежности системы и входящих в нее элементов и, в целом, повысить достоверность получаемой измерительной информации.

Литература

1. А. Макаренко. Введение в сетецентрические информационно-управляющие системы http://www.rdcn.ru/estimation/2010/03042010.shtml.

2. Роджерс К., Укладки и покрытия, пер. с англ., М.; Мир, 1968.-134 с.

3. Шубников А.В., Копцик В.А. Симметрия в науке и искусстве, М.: Наука, 1972. -349 с

4. Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. Введение в теорию массового обслуживания, М.: Наука, 1987. – 336 с.

5. Клейнрок Л. Теории массового обслуживания, М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

6. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения .М.: Сов. радио, 1971. – 520 с.

7. Басакер Р., Саати Т. Конечные графы и сети. М.: Наука, 1974. 368с.

8. Оре О. Теория графов. 2-е изд. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980 - 336 с.

9. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций. М.: Советское радио, 1964. — 390с.

10. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. 2-ое изд. М.: Наука, 1988. — 208с.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА СЛОЖНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

С.И. Каменев

ТОИ ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Тел.: (423) 231-16-31, Факс: (423) 231-25-73
e-mail: kamenev@poi.dvo.ru

Рассматриваются технические средства, позволяющие, при соответствующем алгоритмическом обеспечении, осуществлять пространственно-временную обработку принятых сложных фазоманипулированных сигналов.

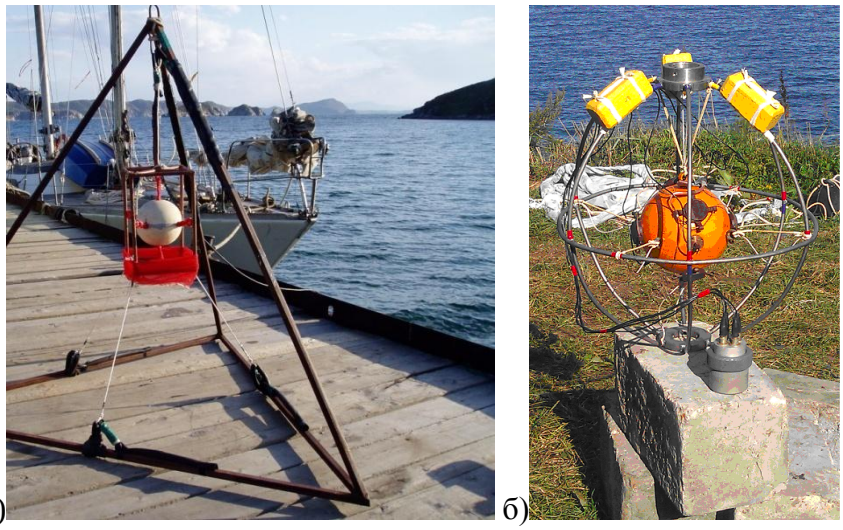
В практике подводных исследований океана, проводимых отделом технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН, широко применяются методы акустического зондирования гидрофизических неоднородностей океана, построенные на принципе излучения сложного сигнала с фазовой манипуляцией и приеме данного сигнала в удаленной точке точечной акустической антенной – приемником давления. При этом для повышения разрешения во времени, при обработке выполняется свертка принятого сигнала с излученным, что позволяет определять времена приходов зондирующего сигнала и по ним реконструировать картину распространения акустических волн, по которой, в свою очередь, можно оценить влияние гидрофизических параметров и неоднородностей среды [1]. Данный метод оценки времени прихода сигнала как важной кинематической характеристики (и связанной с ним групповой скорости) находит применение также при решении ряда прикладных технических задач, к которым относится, например, проблема передачи команд управления на подводные объекты по гидроакустическому каналу связи [2].

Список кинематических характеристик может быть расширен с использованием представления об инварианте пространственно-частотной интерференционной структуры звукового поля, определяемого в координатах частота-расстояние (ω,R) в окрестности точки (ω_0,R_0) как $\beta = (\Delta\omega/\omega_0)/(\Delta R/R_0)$ или как зависимость групповой скорости от фазовой Сг(Сф) [3]: $\beta = -\,\partial(1/Сф)/\partial(1/Сг)$.

В [4, 5] дано определение инвариантной скорости $C_\beta = (1+\beta)/(1/Сф+\beta/Сг)$, обладающей существенно меньшей изменчивостью по сравнению с фазовой и групповой скоростями, $\Delta C_\beta /C_\beta \cong (\Delta Сф /Сф)^2 \cong (\Delta Сг/Сг)^2$. Для плоского волновода с однородным заполнением типичное значение инварианта $\beta \approx 1$, для волновода с выраженным канальным профилем инвариант $\beta \approx -3$. В [5] дано обобщение понятие инварианта на случай трехмерного клина с однородным заполнением и показано, что инвариант зависит только от глубин места источника ho и приемника h, $\beta = ho/h$. Для однородного волновода с произвольным законом расширения h(r) инвариант пространственно-частотной интерференционной структуры определяется выражением $\beta = r/h^2(r)/\int h^2(r)dr$, где интегрирование проводится по трассе, соединяющей корреспондирующие точки.

Техническим средством, реализующем новые подходы в акустической томографии морской среды, является векторный приемник (ВП) (рис. 1). В работе [6] для мониторинга динамических процессов на шельфе используется выражение $\alpha = \mathrm{arctg}[Uz/\sqrt{(Ux^2+Uy^2)}]$, где Uz, Ux, Uy - значения максимумов корреляционной функции в вертикальном и горизонтальных каналах ВП соответственно. Данный способ [10] позволяет связать две кинематические характеристики: время и направление прихода акустической энергии и тем самым получить более полное представление о свойствах морской среды, а также получить

дополнительные возможности при проектировании технических систем. В работах [8,9] с использованием ВП измерялись звуковое давление P и компонента колебательной скорости V в направлении на источник, и, при известной плотности среды ρ_1, определялась фазовая скорость Сф как $1/Сф = \rho_1|P||V|\cos(P,V^*)/|P|^2$, где * - обозначает комплексное сопряжение.



а) б)

Рис.1. Векторные приемники, разработанные в лаборатории акустической томографии (а) и лаборатории акустических шумов (б) отдела технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН

Можно показать, что кинематические характеристики могут быть также определены через градиенты фазы принятого сигнала по частоте – групповая скорость и по пространственным координатам – проекции фазовой скорости.

Особенности распространения сложного сигнала на шельфе характеризуются видом импульсных характеристик, полученных, как указано выше, в результате корреляционной обработки. Для волновода с однородным заполнением при различных глубинах Z размещения приемника данные численного эксперимента, основанного на обобщении модовых соотношений, приведенных в [5] для расширяющегося волновода, на случай широкополосного возбуждения, демонстрируют хорошее соответствие с методом мнимых источников [7]. При изменении глубины приемника происходит перераспределение источников, составляющих дипольные пары. При типичном для натурных экспериментов размещении источника и приемника вблизи дна на расстояниях $\delta o \ll ho$ и $\delta \ll h$ соответственно, дипольные пары трансформируются в четверки (квадроуполи). Если для определенности положить $\delta o > \delta$ и $ho = h$, то последовательность приходов импульсов относительно базового расстояния $Ro = \sqrt{(r^2+4n^2h^2)}$ определится соотношениями: $\{-2nh(\delta o+\delta)/Ro;\ -2nh(\delta o-\delta)/Ro;\ 2nh(\delta o-\delta)/Ro;\ 2nh(\delta o+\delta)/Ro\}$, где n – число отражений от верхней границы. При этом абсолютное значение угла скольжения возрастает, а знаки чередуются, что с помощью ВП, в отличие от одиночного приемника давления, позволяет надежно разделить приходы.

В реальные условия эксперимента на шельфе (типичным является акустико-гидрофизический полигон ТОИ ДВО РАН вблизи м. Гамова в Японском море) формируется придонный звуковой канал, параметры которого связаны с сезонной и суточной изменчивостью гидрологии. Это определяет появление в импульсной характеристике канала откликов с кинематическими параметрами, соответствующим компонентам акустического поля, как захваченным волноводом, так и не взаимодействующим с поверхностью. Таким образом, в импульсной характеристике волновода будут представлены приходы с инвариантами пространственно-частотной интерференционной структуры различных знаков. Поскольку добротность реальных акустических излучателей составляет величину 8-10,

проблема разделения приходов и, следовательно, возможность измерения соответствующих приходам кинематических характеристик становится затруднительной.

Представляется перспективной разработка технического средства, измеряющего инвариант пространственно-частотной интерференционной структуры звукового поля с использованием базовых соотношений, приведенных в [3].

Обозначив амплитуду результата интерференции двух компонент звукового поля частоты ω_0 с индексами l и m на базовом расстоянии R_0 как $A_{lm}(R_0, \omega_0)$, можно оценить производные интерференционной амплитуды по расстоянию и частоте как

$$\frac{\partial A_{lm}}{\partial R} \approx i\omega_0 \left(1/c_{гl} - 1/c_{гm} \right) A_{lm};$$
$$\frac{\partial A_{lm}}{\partial \omega} \approx iR_0 \left(1/c_{гl} - 1/c_{гm} \right) A_{lm}.$$

Измеряя A_{lm} на другой дистанции и другой частоте с малыми приращениями ΔR и $\Delta\omega$ соответственно, получим

$$A_{lm}(R_0 + \Delta R, \omega_0 + \Delta\omega) = A_{lm}(R_0, \omega_0) + \Delta R \frac{\partial A_{lm}}{\partial R} + \Delta\omega \frac{\partial A_{lm}}{\partial \omega}$$

и, далее,

$$A_{lm}(R_0 + \Delta R, \omega_0 + \Delta\omega) = A_{lm}(R_0, \omega_0)[1 + i\omega_0 \left(1/c_{фl} - 1/c_{фm} \right) \Delta R + iR_0 \left(1/c_{гl} - 1/c_{гm} \right) \Delta\omega].$$

Если следовать вдоль максимумов интерференционной картины поля на плоскости «частота-расстояние», то справедливо соотношение

$$\sum_{l,m} A_{lm}(R_0, \omega_0)[\omega_0 \left(1/c_{фl} - 1/c_{фm} \right) \Delta R + R_0 \left(1/c_{гl} - 1/c_{гm} \right) \Delta\omega] = 0,$$

из которого следует

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta R} = -\frac{\omega_0}{R_0} \left(\frac{1}{c_{фl}} - \frac{1}{c_{фm}} \right) / \left(\frac{1}{c_{гl}} - \frac{1}{c_{гm}} \right)$$

и, в соответствии с определением инварианта,

$$\beta = -\frac{\sum_{l,m} A_{lm}(R_0, \omega_0) \left(1/c_{фl} - 1/c_{фm} \right)}{\sum_{l,m} A_{lm}(R_0, \omega_0) \left(1/c_{гl} - 1/c_{гm} \right)}.$$

В заключение отметим следующее. Поскольку данный алгоритм связан с направлением линий максимумов интерференционной картины звукового поля на плоскости «частота-расстояние», то измерительное устройство, реализующее приращение ΔR, может быть достаточно длинной двухэлементной базой (рис.2), ориентированной в направлении на источник излучения. Как показывают многочисленные расчеты [3-5], линии максимумов сохраняют постоянство угла наклона (значение инварианта) на значительном расстоянии, Для несущих частот сигналов до 6 кГц длина базы, работающей при глубинах места порядка 30-100 м, может составлять 2-3 м. Приращения $\Delta\omega$ при этом обеспечиваются представлением принятого сложного сигнала в частотной области.

Рис. 2. Двухэлементная база (интерферометр)

Литература

1. Акуличев В.А.,. Моргунов Ю.Н, Каменев С.И.,. Половинка Ю.А, Безответных В.В.,. Буренин А.В, Войтенко Е.А., Стробыкин Д.С. Развитие дистанционных акустических методов и средств исследований в океанологии // Дальневосточные моря России. М.: Наука, 2007. Книга 4. С. 71-86.

2 Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Доклады АН. 2009. Т. 426, № 6. С. 821-823.

3 С.Д. Чупров. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане // Акустика океана (современное состояние), под ред. Л.М. Бреховских - М.: Наука. 1982. С. 71-91.

4 Б.А. Касаткин. Инвариантные характеристики звукового поля в слоистом океане // Доклады АН СССР. 1986. Т. 291. №6. С. 1483-1487.

5 С.П. Аксенов, С.И. Каменев, Б.А. Касаткин. Некоторые характеристики звукового поля в клине, лежащем на жидком полупространстве // Акуст. журн. 1986. Т. 32. Вып. 5. С. 585-590.

6 В.А. Акуличев, А.В. Буренин, Е.А. Войтенко, С.И. Каменев, Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, Д.С. Стробыкин. Векторно-фазовые методы в акустической томографии океана // Доклады АН. 2006. Т. 406. №1. С. 104-107.

7 Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. Теоретические основы акустики океана - Л.: Гидрометеоиздат. 1982. 264 с.

8 С.И. Каменев, Ю.Н. Моргунов, В.М. Плясов. Мониторинг поля течений на шельфе // Доклады IX школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XII сессией Российского акустического общества – М.: ГЕОС. 2002. С.136-139.

9 С.И. Каменев, В.И. Короченцев. Векторно-фазовые измерения кинематических характеристик акустического поля // Доклады X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских, совмещенной с XIV сессией Российского Акустического Общества - М.: ГЕОС. 2004. С. 475-478.

10 Патент РФ 2221261 Способ акустического зондирования океана / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А., Моргунов Ю.В., Каменев С.И., Нужденко А.В., Дзюба В.П. Заявлен 09.07.2002. Опубликован 10.01.2004.

СИСТЕМЫ ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛОЖНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

А.В. Буренин, С.И. Каменев, В.В. Безответных

ТОИ ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Тел.: (423)-231-16-31, Факс: (423)-231-25-73
e-mail: shurick_burenin1@mail.ru, kamenev@poi.dvo.ru

Описываются варианты систем звукоподводной связи с использованием сложных фазоманипулированных сигналов, разработанные в отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН. Обсуждаются также предварительные экспериментальные результаты совместного применения сложных фазоманипулированных сигналов и метода обращения времени для обеспечения надежной передачи команд управления на подводные объекты в условиях многолучевости и сильной мультикативной помехи.

Разработка методов и технических средств передачи информации по гидроакустическому каналу тесно связана с исследованием особенностей распространения акустической энергии в районах функционирования подводных объектов. В первую очередь представляет интерес исследование когерентности и стабильности амплитудно-фазовых характеристик акустических сигналов [2, 4], влияющих на достоверность и скорость передачи информации, а так же на скрытность и имитостойкость систем связи. В работе рассматриваются разработанные авторами варианты систем звукоподводной связи с использованием псевдослучайных сигналов на основе М-последовательностей, предназначенных для передачи команд управления на подводные объекты.

Разработка систем звукоподводной связи с применением псевдослучайных сигналов является предметом исследований многих авторов, как в России, так и за рубежом [3, 6, 7]. В наших работах [1, 2, 4, 5] на основе анализа современных достижений в области звукоподводной связи были рассмотрены вопросы генерации и обработки сложных широкополосных сигналов и проанализирован опыт применения таких сигналов для передачи цифровой информации в условиях многолучевого распространения. Современные технические средства, разработанные в отделе технических средств ТОИ ДВО РАН, дали возможность развить подходы к созданию облика звукоподводных систем связи на основе этих сигналов. В частности, это позволило создать высокоскоростную систему звукоподводной связи [1]. Принцип работы этой системы связи основан на разделении во времени лучевой структуры акустического поля с последующим энергетическим суммированием всех пришедших в точку приема лучей.

Системы звукоподводной связи, предназначенные для передачи команд управления на подводные объекты, должны гарантировать большую достоверность, достигающую 99,9% (вероятность искажения менее 0,1%) при передаче одной команды. Иногда при передаче команд предъявляются еще более высокие требования к достоверности (вероятность искажения команды не должна превышать 10^{-6} - 10^{-8}). При этом существенно снижены требования к скорости передачи (время передачи команды может быть значительным – порядка секунд).

Один из вариантов системы передачи команд управления на подводные объекты, разработанный авторами, основан на последовательной передаче бинарного информационного сообщения с помощью двух ортогональных М – последовательностей. Одна М - последовательность используется для кодировки логического нуля, другая – логической единицы. Блок-схема данной системы звукоподводной связи представлена на рисунке 1.

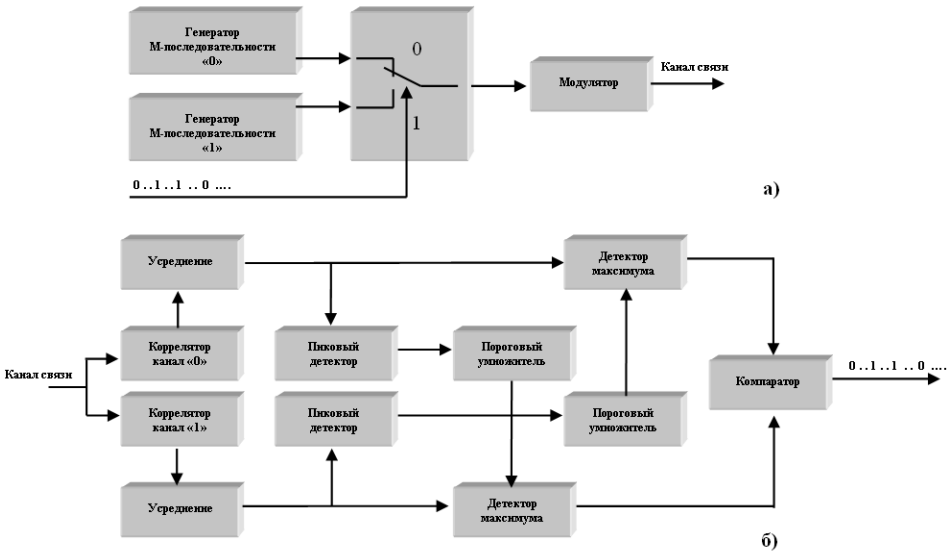


Рис. 1. Блок-схема двухканальной системы передачи команд управления:
а) кодер-передатчик; б) приемник-декодер (пояснения в тексте)

Кодер-передатчик состоит из двух генераторов ортогональных М - последовательностей и мультиплексора. В зависимости от входного значения информационного потока, выход одного из двух генераторов коммутируется на вход модулятора. Результирующий бинарный сигнал модулируется и передается в канал связи. Биты информационной посылки поступают через интервалы, равные времени генерации последовательности. Собственно генераторы представляют собой микропрограммную реализацию линейных регистров сдвига с заданными обратными связями. Программы генерации 255-символьных М – последовательностей с условными номерами 178 и 180 были реализованы в рассматриваемом варианте системы передачи команд управления на подводные объекты. Приемник-декодер организован в виде двух идентичных каналов корреляционной обработки ортогональных М – последовательностей одинаковой длины. Алгоритм демодуляции сводится к сравнению уровней корреляции по каналам за интервалы времени, равные длительности последовательности. При превышении одного уровня над другим в течение этого интервала времени, принимается решение о переданной последовательности, и на выходе устанавливается соответствующий логический уровень.

Основной проблемой реализации данного алгоритма обработки сигнала, является определение принятой последовательности по наличию корреляционного пика. Для решения данной проблемы используется метод взаимного сравнения уровней корреляций в ортогональных каналах. Передача последовательностей друг за другом, приводит к появлению основных пиков в каналах в различные моменты времени. То есть, при появлении корреляционного максимума в одном из каналов, в другом будут регистрироваться боковые лепестки. Это дает возможность непосредственного сравнения уровней в каждый момент времени с помощью компаратора в постоянно изменяющихся условиях приема.

Экспериментальная апробация системы передачи команд проводилась подо льдом Амурского залива в марте 2010 года на частоте 6000 Гц и в бухте Витязь (залив Посьета) в сентябре 2011 года на частоте 2000 Гц. Корреспондирующие точки в обоих случаях размещались вблизи береговой черты на небольших глубинах на расстоянии около 1 км друг от друга. Излучались приведенные выше 255-символьные М – последовательности с числом периодов на символ равным 4. В качестве информационных последовательностей использовалась последовательности нулевых и единичных битов, образующих байт Американского стандартного кода для обмена информацией (ASCII). После дополнения стартовым и стоповым битами информационная последовательность переводилась в стандарт RS-232, который определял правила последовательной передачи цифровых данных между передатчиком и приемником на указанных частотах со скоростями 5,88 и 1,96 бит/с

соответственно. Результаты эксперимента в бухте Витязь приведены на рисунке 2, где показан результат обработки принятой информационной последовательности - символа ASCII «1» (31hex): выход сигнала с корреляторов после усреднения, выход сигнала с детекторов максимумов, выход с компаратора. В условиях реального эксперимента отношение сигнал/шум было высоким и сбоев в передаче символов не было зарегистрировано. Таким образом, можно говорить о надежной передаче 256 команд управления на подводный аппарат за время 0,51 сек. на команду. Оценка влияния аддитивного шума на работоспособность системы, проведенная в лабораторных условиях, показала, что вероятность битовой ошибки не превышает 10^{-3} при отношении сигнал/шум на входе коррелятора, равным –14 дБ.

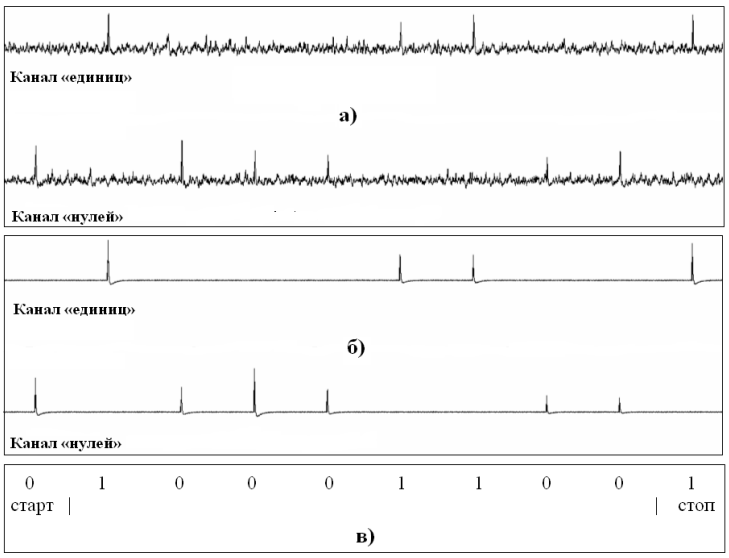


Рис.2. Прием символа ASCII «1» (31hex): а) выход сигнала с корреляторов после усреднения; б) выход сигнала с детекторов максимумов; в) выход с компаратора

Был также реализован вариант системы передачи команд, в котором использована схема связи с передачей опорного сигнала по гидроакустическому каналу. Такой подход во многом аналогичен методу обращения времени [7-9]. После приема информационного и опорного передаваемых сигналов осуществлялась их взаимная корреляционная обработка. При этом обеспечивалось разделение во времени лучевой структуры акустического поля с последующим энергетическим суммированием всех пришедших в точку приема лучей. Техническая реализация и экспериментальная апробация данной системы передачи команд позволили получить время передачи равное 1-3 секунды на команду, что много меньше типичных параметров когерентности гидроакустического канала [4], и гарантировало надежное выделение команды в результате обработки.

Традиционно, в отечественных и зарубежных экспериментальных работах по классическому обращению времени используются короткие сигналы (длительностью порядка нескольких десятков мс) в виде гауссовского импульса или его производных, сигналов с линейной или нелинейной частотной модуляцией. Принцип обращения времени предполагает излучение сигнала s(t) длительностью T пробным источником, прием сигнала $r_i(t)$, прошедшего через среду с импульсной характеристикой $h_i(t)$, i-м элементом вертикальной приемоизлучающей антенны и переизлучение обращенных во времени сигналов в точку расположения пробного источника, где пассивная вертикальная антенна регистрирует сигнал p(t). Функция $q(t)=h(-t)*h(t)$ характеризует основную идею метода обращения времени. В нашей работе исследовались как параметры q-функции, так и возможность варьировать и идентифицировать эти параметры, используя в схеме обращения

вместо вертикальной антенны продолжительные фазоманипулированные М-последовательностью сигналы (длительностью порядка сотен мс).

Сценарии экспериментов 2011г. и 2012г. были, практически, идентичны за исключением того, что в 2012 г. несущая частота зондирующего сигнала была Fo=6 кГц, а не Fo=2 кГц, как в 2011 г., и в 2012 г. были добавлены: дополнительный алгоритм излучения и две модификации схемы обращения. Трасса распространения акустических сигналов была организована в мелководной бухте Витязь. Приемоизлучающие системы TRS и SR располагались в 1 метре от дна с общей глубиной места 10 м, на расстояние 1123 м друг от друга. Излучение сигналов осуществлялось в течение суток, периодом повторения T=30 с. В качестве зондирующего сигнала s(t) использовался сложный фазоманипулированный сигнал на основе М-последовательности, длиной последовательности 255 символов и с длиной одного символа равной 4 периодам несущей частоты. Алгоритм излучения 2011 г. (обозначим его «А») заключался в том, что в каждый i-ый момент времени TRS использовала функцию отклика канала (ФОК), соответствующую текущему моменту времени i. В 2012 г. вместе с алгоритмом «А» использовался алгоритм «Б», в котором в любой i-ый момент времени система TRS использовала только ФОК, полученную в момент времени i=0. Алгоритм «Б» был призван оценить, на сколько долго можно фокусировать энергию сигнала в точке приема. Обработка и анализ натурных данных заключались в следующем. Оценивались отношение ширины пика $q_{exp}(t)$ к ширине пика автокорреляционной функции зондирующего сигнала («ширина»), и отношение значения амплитуды пика $q_{exp}(t)$ к значению максимуму функции отклика канала («высота»).

Результаты экспериментов 2011 г. (рис. 3) по алгоритму «А» показали, что: 1) «ширина» изменяется в пределах от 1 до 2, а «высота» от 1 до 4; 2) кривые «ширина» и «высота» изменяются плавно, без значительных флуктуация; 3) если «ширина» приближается к значению 2 и превышает его, то «высота» уменьшается.

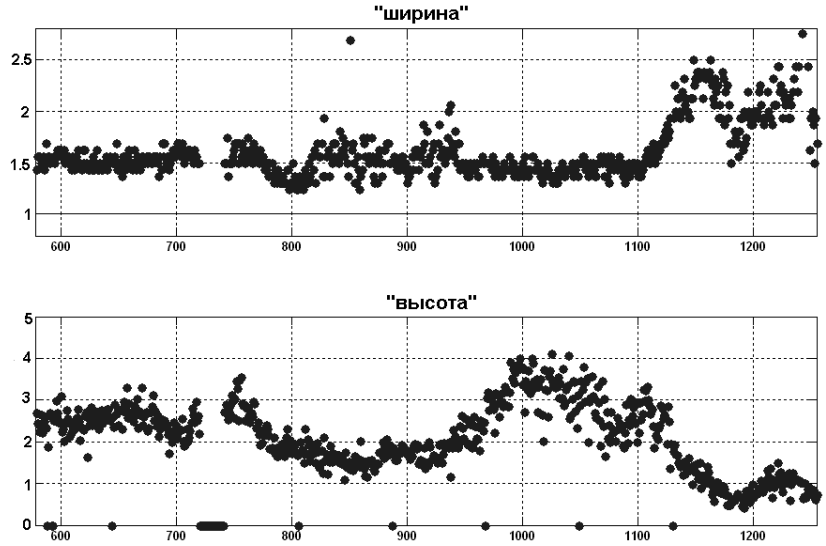


Рис.3. Натурные данные 2011 г., отношение ширины пика $q_{exp}(t)$ к ширине пика автокорреляционной функции зондирующего сигнала («ширина»), отношение значения амплитуды пика $q_{exp}(t)$ к значению максимуму функции отклика канала («высота»)

Результаты исследования по алгоритму «Б» показали, что «ширина» сильно флуктуирует (среднее значение 4.5, амплитуда флуктуаций 2.5); 2) кривая «высота» изменяются плавно, в диапазоне от 0.75 до 2; 3) энергия сигнала может фокусироваться достаточно долгое время (более суток).

Подводя итог, отметим, что испытанные системы передачи команд управления обеспечивают уверенную идентификацию команд в достаточно сложных условиях распространения, определяемых гидрологией и геометрией трассы. Для второго варианта

системы условия функционирования характеризовались также различным размещением корреспондирующих точек: излучателя на шельфе и дрейфующей приемной системы в глубоководной части гидроакустического канала. Включение в состав команд управления опорных последовательностей, с одной стороны, позволяет учитывать импульсную характеристику канала и искажения, связанные с условиями распространения акустических сигналов (многолучевость, эффект Доплера и др.) и учесть вклад всех лучевых приходов при выделении информационного сигнала. С другой, передача опорного сигнала вместе с информационным снижает имитостойкость системы. При размещении корреспондирующих точек в шельфовой зоне предпочтительным является двухканальный вариант, обеспечивающий достаточную достоверность и имитостойкость передачи команд управления. Можно также заключить, что измерение *q*-функции волновода с помощью продолжительных во времени сложных сигналов открывает новые возможности в реализации метода обращения времени и применения этого метода для обеспечения надежной передачи команд управления на подводные объекты в условиях многолучевости и сильной мультикативной помехи.

Литература

1. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Доклады АН. 2009. Т. 426, № 6. С. 821-823.
2. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 3. С. 374-380.
3. Захаров Ю.В., Коданев В.П. Экспериментальное исследование акустической системы передачи информации с шумоподобными сигналами // Акустический журнал. 1994. Т. 40, № 5. С. 799-808.
4. Каменев С.И. Экспериментальные исследования характеристик сложных фазоманипулированных акустических сигналов на стационарных трассах различной протяженности // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4). С. 46-52.
5. Каменев С.И. Виртуальная гидроакустическая система обращения времени // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 1(9). С. 47-52.
6. Чепурин Ю.А., Гаврилов А.Н. Передача данных по подводному акустическому каналу: анализ данных эксперимента ACOUS // Доклады 10-й школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2004. С. 222-225.
7. Catipovic J.A. Performance limitation in underwater acoustic telemetry // IEEE J. Oceanic Engineering. 1990. V. OE-15, № 3. P. 205–216.
8. Sabra K.G. *et al*. Experimental demonstration of iterative time-reversed reverberation focusing in a rough waveguide. Application to target detection // J. Acoust. Soc. Am. 2006. V. 120. P. 1305-1314.
9. Song H.C. *et al*. Experimental demonstration of adaptive reverberation nulling using time reversal // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 118. P. 1381-1387.

ЛАЗЕРНЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ВОДНЫХ ПОТОКОВ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ СУДОВ

А.Е. Бронецкий, Ю.Д. Каминский, В.И. Мартынова, С.Ю. Проскурнёв

ГНЦ РФ ОАО «НИИТеплоприбор».
129085, Москва, проспект Мира, 95, тел/факс (495) 6157800
e-mail: kaminjd@mail.ru

В статье рассматриваются перспективы создания измерителя скорости течения водных потоков на базе методов лазерной доплеровской анемометрии, технические решения основных узлов – лазерных доплеровских датчиков и систем обработки доплеровских сигналов, приведены результаты испытаний экспериментального образца (ЛИС-Т) и характеристики испытательного стенда, дано описание и характеристики двухканального относительного лага ЛАГ-Л-2, разработанного на базе ЛИС-Т.

Одно из перспективных направлений развития современного морского приборостроения – применение лазерных измерительных технологий, в частности, методов лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) для измерения скорости и направления течения водных потоков, а также относительной скорости, пройденного расстояния и направления движения надводных судов и подводных аппаратов [1,2].

Высокие метрологические и динамические характеристики, ограниченное влияние внешних факторов, помехозащищенность, имитационная градуировка и поверка, а также высокая надежность современных полупроводниковых лазеров определяют эффективность применения лазерных доплеровских измерителей.

В ГНЦ ОАО «НИИТеплоприбор» совместно с ОАО «Концерн «Моринформсистема-Агат», Институтом океанологии и Институтом водных проблем РАН в рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники» были проведены исследования и разработка экспериментальных образцов лазерного доплеровского измерителя скорости водных потоков (ЛИС-Т) и двухканального лазерного измерителя двух составляющих вектора относительной скорости, пройденного расстояния и путевого угла (ЛАГ-Л-2) и проведены их лабораторные испытания.

ЛИС-Т состоит из лазерного доплеровского датчика (ЛД) и преобразователя доплеровского сигнала (ПДС). Анализ возможных вариантов оптических схем ЛД показал, что для создания надежной недорогой модификации, предназначенной для работы в тяжелых условиях эксплуатации в чистой и загрязненной воде, наиболее перспективной являются схема на основе дифракционных расщепителей лазерного пучка [3]. При использовании дифракционных расщепителей на фазовых или амплитудных решетках не требуется стабилизации длины волны лазера, а, соответственно, стабилизация температуры лазера, возможно применение многомодовых лазеров, а также значительно уменьшается чувствительность к расфокусировке оптической системы и повышается виброустойчивость датчика.

Для уменьшения вероятности загрязнения оптическое окно обрабатывается методом глубокой шлифовки-полировки с нанесением специальных гидрофобных покрытий.

Для упрощения конструкции и технологии юстировки, уменьшения количества оптических элементов датчик выполнен на базе интегрального оптического модуля.

Внешний вид лазерного датчика скорости (ЛД-03) приведен на рис. 1.

Рис. 1. Внешний вид лазерного датчика скорости ЛД-03

Корпус датчика выполнен в водозащитном исполнении из материала АмГ5 с покрытием КД10ХР, разработан также облегченный вариант из капролона.

Обработка выходного сигнала лазерных доплеровских датчиков представляет достаточно сложную задачу, определяемую случайным характером сигнала, нарушением монотонности и «паразитными» переходами через нулевой уровень, фазовыми и градиентными шумами и пр. [4].

В последнее время для обработки доплеровских сигналов наибольшее распространение получили различные варианты счетно-импульсных процессоров, основанных на выделении переходов сигнала через нулевые значения, как аппаратными, так и программными средствами.

Высокоточный счетно-импульсный сигнальный процессор, оптимизированный для работы в ЛИС-Т, должен обеспечивать:

- максимальное число отсчетов в единицу времени,
- минимальную вероятность ложных отсчетов,
- оптимальное усреднение информации.

Реализация указанных условий определяет структуру счетно-импульсного ПДС, который имеет следующие преимущества:

- используется счетный метод непосредственного измерения периода доплеровской частоты, который всегда предпочтительнее косвенных методов по результатам обработки спектра,
- используется параллельная обработка сигналов во всем диапазоне частот, что обеспечивает повышение надежности работы при высоком уровне турбулентных пульсаций,
- обеспечивается конвейерная обработка сигнала, при которой нет потерь информации,
- автоматически учитывается стохастический характер появления сигналов путем заполнения пауз между отсчетами частотой синтезатора по последнему отсчету.

12-канальный ПДС выполнен на микроконтроллерах ф. Atmel, относительная погрешность измерения доплеровской частоты ≤ 0,05% в диапазоне 100 Гц – 100 кГц.

Определенным недостатком разработанного ПДС, использующего аналоговый полосовые фильтры, являются высокие требования к частотно-фазовым характеристикам, что требует применения точных и высокостабильных элементов и, соответственно, усложняет производство ПДС при серийном выпуске.

Наиболее радикальным решением вопроса создания высокоточного, широкодиапазонного и технологичного ПДС является применение цифровых сигнальных процессоров (DSP). Использование современных процессорных модулей на базе DSP, отличающихся низкой стоимостью, надежностью работы в широком диапазоне температур, набором периферийных систем ввода/выхода, а также поддержкой современных операционных систем позволит наиболее эффективно решать вопросы обработки доплеровских сигналов. Применение алгоритмов на базе вейвлет-разложения [5] позволяет

успешно решать вопросы построения многоканальных цифровых фильтров в широком диапазоне доплеровских частот.

ПДС-02 выполнен на базе процессорного модуля SDM-AM180 (ф. Texas Ins.), обеспечивает относительную погрешность измерения доплеровской частоты ≤ ±0,1% в диапазоне доплеровских частот 100 Гц ÷ 500,0 кГц.

Испытания ЛИС-Т были проведены на проливной установке с открытым каналом ПУ-01 с образцовым лазерным измерителем скорости ЛДИС-01 с относительной погрешностью ≤ ± 0,1% и на большом гидравлическом лотке “Armfield S6-Mk11” (Англия) РГГУ (Москва) рис. 2.

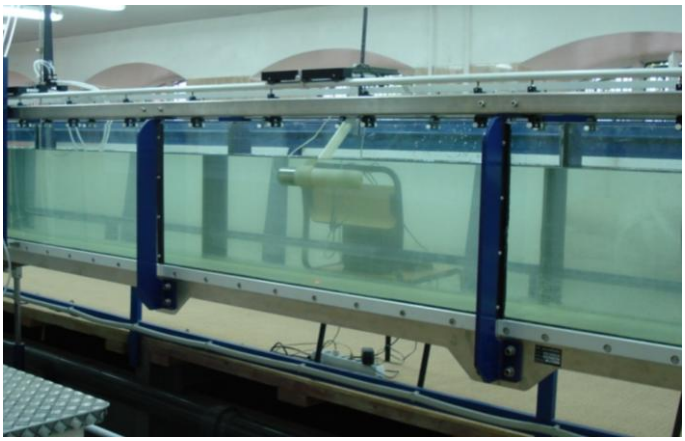


Рис. 2. ЛИС-Т на гидравлическом лотке “Armfield S6-Mk11”

Необходимо отметить принципиальное преимущество лазерных измерителей скорости – возможность их градуировки и поверки на имитационном стенде СИ-01, обеспечивающем относительную погрешность воспроизведения скорости Δ= ±0,015% в диапазоне скоростей 5 мм/с – 20 м/с, полную автоматизацию процесса измерений и документирование результатов.

На СИ-01 получен сертификат об утверждении типа средств измерений RV.E.28/010A № 31383. Внешний вид стенда приведен на рис. 3.

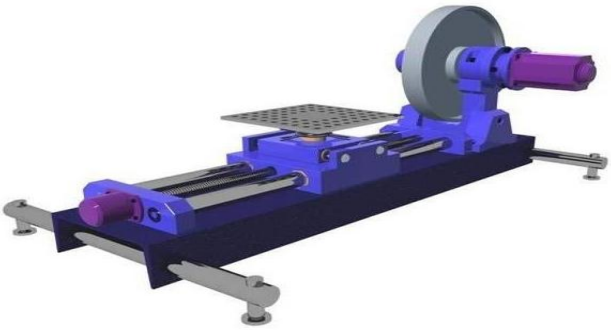


Рис. 3. Внешний вид стенда СИ-01

Разработанный экспериментальный образец ЛИС-Т обеспечивает измерение скорости течения в диапазоне скоростей 5 мм/с – 10 м/с, имеет основную относительную погрешность ± 0,15%, рабочее расстояние (от датчика до точки измерения) (50 ± 2) мм.

На базе ЛИС-Т был разработан двухканальный относительный лаг – ЛАГ-Л-2. Внешний вид прибора показан на рис. 4.

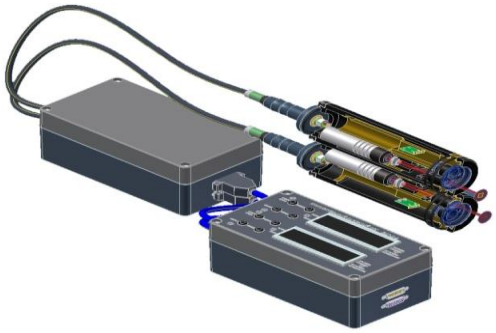


Рис. 4. Внешний вид лазерного лага ЛАГ-Л-2

ЛАГ-Л-2 обеспечивает измерение двух составляющих вектора скорости в диапазоне скоростей V = 0,01 – 50,0 уз и пройденного расстояния в диапазоне L = 0,1 – 99999 м.м. с относительной инструментальной погрешностью $\Delta \leq \pm 0{,}15\%$, а также измерение средней скорости и путевого угла.

В состав лага входят два лазерных датчика ЛД-03, двухканальный преобразователь доплеровских сигналов ПДС-2, блок вычисления и индикации БВИ.

Рабочее расстояние лазерных датчиков 72 мм, возможно его увеличение до 100- 150 мм.

Для снижения погрешности измерения скорости, определяемой влиянием погранслоя, разработана методика с определением скорости в двух точках (V_1 и V_2) на расстоянии L_1 и L_2. В этом случае скорость судна может быть определена как:

$$V_0 = f\,(V_1, V_2, L_1, L_2) \qquad (1)$$

$$V(L_1) = V_0/2\,\left(1 + \sin\frac{2(L_1/\delta - 1)\pi}{2}\right) \qquad (2)$$

$$V(L_2) = V_0/2\,\left(1 + \sin\frac{2(L_2/\delta - 1)\pi}{2}\right) \qquad (3)$$

где $V(L_1)$ и $V(L_2)$ – измеренные значения скорости на расстоянии L_1 и L_2 от ЛД

δ - толщина пограничного слоя,

V_0 - вычисленное значение скорости с учетом толщины пограничного слоя (на расстоянии “δ” от лазерного датчика в основном участке потока).

V_1 и V_2 могут быть определены с использованием двухканального фотоприемного устройства [6].

Полученные результаты подтверждают возможность создания ряда моделей лазерных измерителей скорости различного назначения, отличающихся высокой точностью, широким диапазоном измерений, малыми габаритами и невысокой стоимостью, конкурентоспособных в РФ и за рубежом.

Литература

1. Э.Г. Звенигородский, Ю.Д. Каминский, В.И. Мартынова, С.Ю. Проскурнев, П.В. Рогов, В.К. Роднина. Лазерные и оптические приборы для измерения скорости, расхода и длины. Приборы, 8, 2005, с. 12 -23.
2. Dophide D., Strunck V., Muller H., Kaminski Yu., Proskurnev S. Optical flow rate measurement technologies in Germany and Russia. 1998 International gas research conference/ San Diego. California, USA. 8-11 November 1998.
3. Jurgen Czarske, Harald Muller, Fromund Hock. Verwendung von Beugungsgittern in der Laser-Doppler-Anemometrie. Technisches Messen 61 (1994) 7/8
4. Соболев В.С. Лазерные доплеровские измерительные системы. Автореферат докторской диссертации. Новосибирск, 1996
5. Дьяков В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М. Салон-Р, 2002
6. Патент на изобретение № 2435166 от 27.11.2011 г. «Лазерный измеритель скорости водных потоков».

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ ЗВУКА И СТРУКТУРА МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ В МЕЛКОМ МОРЕ

В.А. Буланов, А.В. Стороженко

Тихоокеанский океанологический институт имени В.И.Ильичева ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43 Тел.: (423)2374913
e-mail: storozhenko_and@mail.ru

Представлены результаты исследований рассеяния звука с целью определения временной изменчивости гидрофизических характеристик морской воды и динамики биомассы в приповерхностном слое мелкого моря при различных условиях. Измерения коэффициентов рассеяния звука в приповерхностном слое моря проводились с применением излучателей, направленных вверх и располагающихся на донной станции на глубине около 12 метров, а также на ходу с небольшого судна вдоль различных трасс в заливе Петра Великого Японского моря. С целью получения функции распределения по размерам планктона были выполнены одновременные исследования рассеяния звука на различных частотах и сетные обловы планктона in situ. Эти данные позволили уточнить связь между данными о коэффициенте рассеяния звука и биомассой.

Введение. Для описания рассеяния звука в среде с микронеоднородностями вводят понятие коэффициента рассеяния m_V [1,2], который в приближении однократного рассеяния для остронаправленных излучателей определяется согласно выражению:

$$m_V = \frac{2}{\pi c \tau \theta^2}\left(\frac{I_{bs}}{I_i}\right), \tag{1}$$

где $I_{bs} \sim P_{bs}{}^2$, $I_i \sim P_i^2$ - интенсивности падающего на неоднородность, на расстояние r от излучателя и рассеянного назад звука, соответственно, при этом P_i и P_{bs} - амплитуды падающей и рассеянной в обратном направлении волны, τ - длительность импульса, θ - полуширина характеристики направленности, с – скорость звука.

Исследования рассеяния звука в приповерхностном пузырьковом слое. Функция распределения пузырьков по размерам *g(R)* может быть найдена по частотной зависимости экспериментально измеренного коэффициента рассеяния звука $m_V(\omega)$ в предположении, что основной вклад в рассеяние звука вносят резонансные пузырьки [1-3], радиус которых связан с частотой по формуле Миннерта $R(\omega) = \sqrt{3\gamma P_0 / \rho}\big/\omega$:

$$g(R(\omega)) = \frac{2\delta_\omega}{\pi R^3(\omega)} m_V(\omega)\,, \tag{2}$$

где δ_ω – коэффициент резонансного затухания на частоте ω.

Исследования временной изменчивости мелкомасштабной структуры приповерхностного слоя моря методом обратного рассеяния звука на стационарной донной станции выявили характерные особенности динамики структуры водного слоя моря, образуемых за счет динамических воздействий (ветровые напряжения, течения, турбулентность и др.) и за счет динамики суточных вариаций планктона [4]. На рис.1 и рис. 2 представлены полусуточные вариации коэффициента рассеяния звука в различные сезоны. Видны существенные отличия в характере изменения функции $m_V(z,t)$ и ее абсолютных значений.

Основные исследования на донной станции были связаны с изучением структуры приповерхностного слоя моря с распределенными воздушными пузырьками, образующимися в результате обрушения ветровых волн [5].

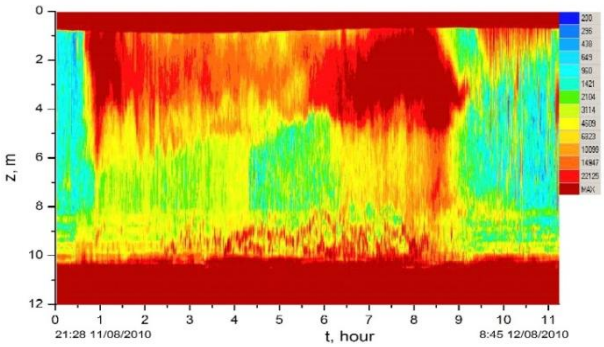


Рис. 1. Вариации $m_V(z,t)$ на частоте 138 кГц летом

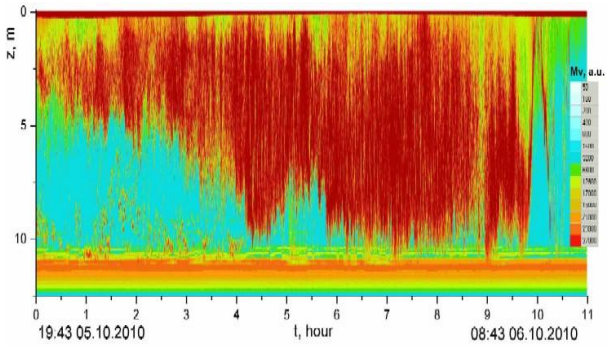


Рис. 2. Вариации $m_V(z,t)$ на частоте 138 кГц осенью

Особенности рассеяния звука, обусловленного изменением структуры пузырьковых облаков, вовлекаемых ветровыми напряжениями и индуцированными течениями, представлены на рис. 3, типичным для мелкого моря при скорости ветра до 12 м/с (результаты были получены летом 2008 г. на донной станции в шельфовой зоне Японского моря).

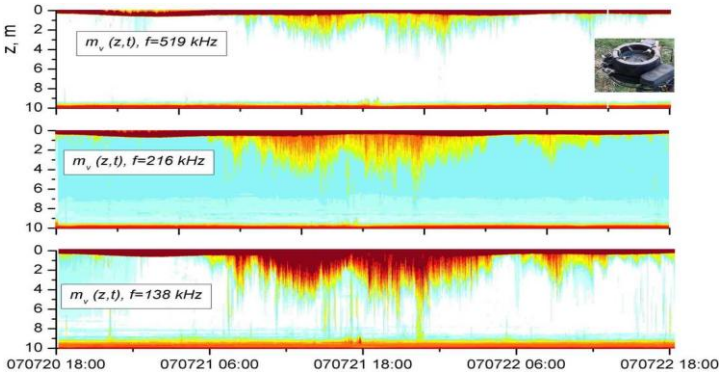


Рис. 3. Вариации $m_V(z,t)$ на различных частотах в течение трех суток от 20.07.2008 до 22.07.2008. Скорость ветра доходила до 12 м/с

Из результатов, представленных на рис. 3, видно, что наблюдается значительное вовлечение пузырьков в толщу морской воды. При этом имеется существенная частотная зависимость, что свидетельствует о наличии существенного распределения пузырьков по размерам, вид функции которого оказывается изменяющимся от глубины вовлечения пузырьков в толщу моря.

Используя полученные частотные зависимости можно было построить функции распределения пузырьков по размерам [2, 3, 5]. На рис. 4 представлены распределения пузырьков по размерам в различные временные промежутки: до шторма, во время шторма и после шторма. Видно, что для слабо возмущенной структуры характерно наличие *g(R)* с максимумом, положение которого изменяется в зависимости от глубины. Совершенно отличная картина наблюдается во время шторма - здесь в приповерхностных слоях образуется большое количество как больших, так и мелких пузырьков в отсутствии видимого максимума, который тем не менее имеется для пузырьков, располагающихся в толще воды с глубинами больше 3 метров.

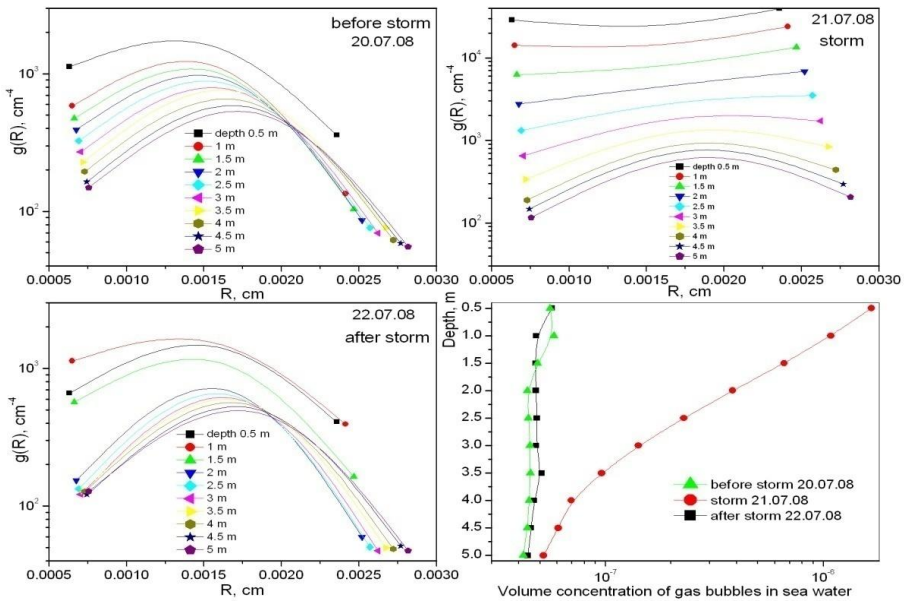


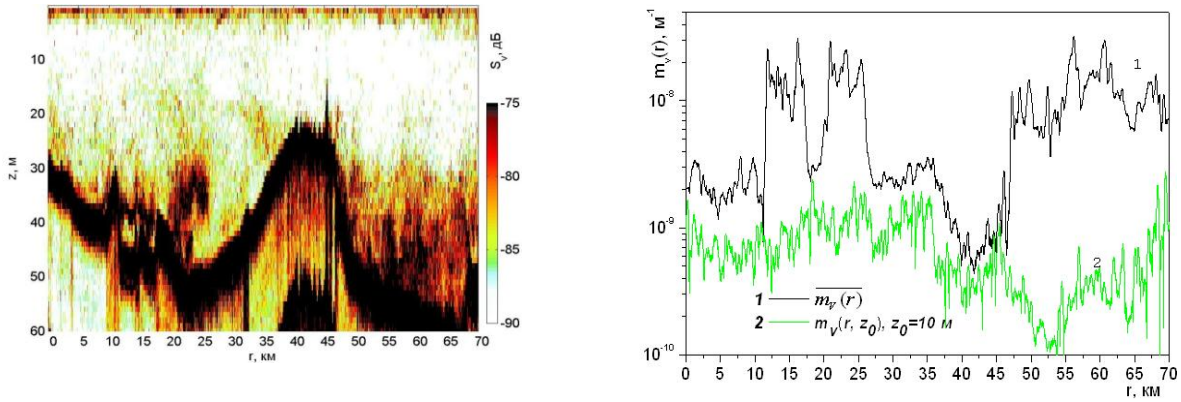
Рис.4. Функция *g(R)* и объемная концентрация газа в пузырьках до шторма, во время шторма и после шторма

Рассеяние звука и оценка планктона в море. Общее выражение, позволяющее по экспериментальным данным для m_V получать данные по распределению биомассы m_g в рамках двух распределений – степенного и гауссовского, можно написать в виде [4, 6]:

$$m_g^{(P,G)}(r,f) = D^{(P,G)}(f)m_v(r,f), \qquad (3)$$

Охарактеризуем наиболее типичные результаты. Удобно ввести в качестве характеристики звукорассеивающих слоев усредненную по толщине слоя $h_{\max}$ величину коэффициента рассеяния $\overline{m_V(r)}$ согласно формуле [4]:

$$\overline{m_V(r)} = \frac{1}{h_{\max}}\left[\int_0^{h_{\max}} m_V(r,z)dz\right]. \qquad (4)$$



а) б)

Рис. 5. а) Распределение обратного рассеяния звука вдоль трассы на шельфе Японского моря в летний период (23.08.2011), б) горизонтальный профиль $\overline{m_V(r)}$ и профиль $m_v(r,z_0)$ на глубине $z_0=10$ м

На рис. 5 представлена картина рассеяния звука вдоль трассы на шельфе Японского моря в летний период (23.08.2011), а также профиль $m_v(r,z_0)$ на глубине z_0=10 м и средний по глубине профиль $\overline{m_V(r)}$. Видно, что рассеиватели распределены крайне неравномерно вдоль трассы и $\overline{m_V(r)}$ изменяется на 2 порядка от $5*10^{-10}$ м$^{-1}$ до $2*10^{-8}$ м$^{-1}$.

Данные по рассеянию звука, полученные вдоль многочисленных трасс в заливе Петра Великого, позволили выявить сезонную динамику зоопланктона и его распределение. Для сопоставления двумерной картины распределения биомассы в море, полученной на основе данных рассеяния звука с результатами обловов, данные коэффициентов рассеяния звука усреднялись по формуле [4]:

$$\overline{\overline{m_V}} = \frac{1}{Lh_{\max}} \int_0^L \int_0^{h_{\max}} m_V(r,z)dzdr \,. \qquad (5)$$

На рис. 6 представлены акустические результаты, полученные в заливе Петра Великого Японского моря, и результаты, полученные биологами методами облова [7].

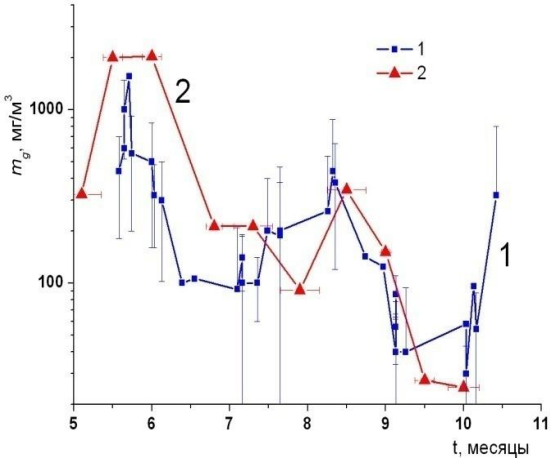


Рис. 6. Сравнение концентрации биомассы, полученных на основе рассеяния звука и в результате облова in situ в различные сезоны года: 1 - $m_g(r)$ по рассеянию звука, 2008-2010 гг., 2 - $m_g(r)$ по результатам облова in situ 1991 г.

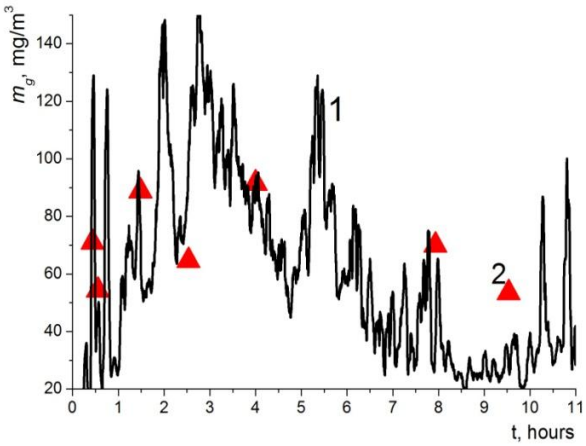


Рис.7. Концентрации биомассы, полученные на основе рассеяния звука и в результате облова in situ в бухте Витязь ночью 14.08.12 (21:00 – 08:00): 1 - $m_g(t)$ по данным рассеяния звука, 2 - $m_g(t)$ по результатам облова.

Из рис.6 видно достаточно хорошее соответствие между акустическими данными и данными облова. Некоторое расхождение кривых на рис. 6, по-видимому, связанно с изменением функции распределения по размерам планктона, обусловленным сезонной динамикой видового состава планктонных сообществ. В августе 2012 г. в течение полусуток в бухте Витязь залива Петра Великого были выполнены одновременные исследования рассеяния звука на частоте 250 кГц и сетные обловы планктона in situ с подробным анализом в лабораторных условиях. Это позволило уточнить связь между данными о коэффициенте рассеяния звука и распределением биомассы.

На рис. 7 сопоставлены концентрации биомассы, полученные на основе рассеяния звука, и результаты непосредственных сетных обловов. Показано, что средние значения биомассы $< m_g >= 1/T \int m_g(t)dt$ по данным рассеяния звука 67 мг/м^3 и выполненным одновременно обловам и 63 мг/м^3 достаточно хорошо совпадают.

Основные выводы. С применением стационарной донной станции была проведена акустическая спектроскопия пузырьков в приповерхностном пузырьковом слое, показано резкое увеличение толщины приповерхностного пузырькового слоя при усилении ветра и определено распределение пузырьков по размерам. Было выявлено соответствие концентрации биомассы на основе рассеяния и в результате обловов в различные сезоны в заливе Петра Великого Японского моря. Были сопоставлены концентрации биомассы, полученные на основе рассеяния звука и в результате непосредственных сетных обловов на полусуточной станции. Показано, что средние значения биомассы, полученные по данным рассеяния звука, равные 67 мг/м^3, и выполненные одновременно обловами и составляющие

величину 63 мг/м^3, достаточно хорошо совпадают. Полученные результаты позволяют предложить быстрый акустический способ для проведения оценок распределения воздушных пузырьков в приповерхностном слое моря, которые важны для оценок взаимодействия океан-атмосфера. Определение распределения планктона акустическим методом на основе рассеяния звука обладает большой оперативностью, высоким пространственным и временным разрешением и сравнительной легкостью получения информации, по сравнению с традиционными методами облова, которые отличаются значительной трудоемкостью и относительно невысокими параметрами пространственного и временного разрешения.

Работа была поддержана грантом государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ- 1052.2012.5, грантом РФФИ 12-02-01048-а, а также грантами ДВО РАН 12-I-П23-03, 12-II-УО-03-007 .

Литература

1. H. Medwin, "In situ acoustic measurements of bubble populations in coastal ocean water" // J. Geophys. Res. Vol. 15, 1970, P. 599-611.
2. Акуличев В.А., Буланов В.А. "Исследования неоднородностей морской среды методами акустического зондирования" / В кн. Дальневосточные моря России: в 4 кн./ Гл. ред. акад. В.А. Акуличев. Кн.4. Физические методы исследования/ отв.ред. Г.И. Долгих. –М.: Наука 2007, с. 129-231.
3. V.A. Akulichev, V.A. Bulanov. "Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering" // J. Acoust. Soc. Am. 2011. Vol.130, No5, pp.3438-3449
4. Акуличев В.А., Буланов В.А., Корсков И.В., Стороженко А.В. "Мониторинг экологического состояния акваторий с применением акустического зондирования" // Подводные исследования и робототехника, №2(14) 2012, с. 43-55.
5. Акуличев В.А., Буланов В.А. О спектре пузырьков газа и возможностях акустической спектроскопии в приповерхностном слое океана // Доклады Академии наук, 2012. Том 446. № 2. с.212-215
6. В.А. Акуличев, В. А. Буланов, А.В. Стороженко. Оценка распределения планктона в океане методом акустического зондирования // Доклады Академии наук. 2011, т.438, №2, с.267-270
7. Касьян В.В., Распределение и сезонная динамика обилия Centropages abdominalis sato и c. tenuiremis thompson et scott (Copepoda) в Амурском заливе Японского моря// Биология моря, 2004. Т. 30, № 2. С.87-95.

ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОГНОЗА ГАЗОГИДРАТОВ И ЗАЛЕЖЕЙ УГЕЛВОДОРОДОВ В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ, В ТОМ ЧИСЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБОТЕХНИКИ

А.И. Обжиров

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН
obzhirov@poi.dvo.ru

Введение

Газогидраты в Охотском море были обнаружены в 1986 году на северо-западном склоне о.Парамушир в районе выхода пузырей метана из донных отложений в воду [1]. В 1998 году в экспедиции на НИС «Морской геофизик», рейс № 34, сотрудниками ТОИ ДВО РАН был открыт первый выход пузырей метана из донных отложений в воду на Сахалинском северо-восточном склоне Охотского моря [1]. Это открытие послужило началом детальных исследований этого региона как для поиска потоков пузырей метана из донных отложений в воду, так и газогидратов. С 1991 года по настоящее время в этом регионе каждый год выполнялись экспедиции по исследованию газогеохимических полей и газогидратов в морских донных осадках, выяснение их геологических и геофизических закономерностей. С 1998 года экспедиции выполнялись по международным проектам – Российско-Германскому (КОМЕКС, 1998-2004), Российско-Японскому_Корейскому (ХАОС, 2003-2006 и САХАЛИН, 2007-2012, 2013-2017). Основной целью является изучение условий формирования и разрушения подводных газогидратов в Охотском море как базы для внедрения новых технологий и технического решения поисков субмаринных газогидратов и добычи из них метана. В настоящее время детальнее рассматривается взаимосвязь формирования газогидратов с нефтегазсодержащими осадочными комплексами и залежами нефти и газа, с сейсмо-тектонической активизацией региона, потоками пузырей метана из осадочных пород в воду и из воды в атмосферу и формированиям аномальных полей метана в донных осадках и воде (рис. 1).

Методика работ

Выполненяется комплекс геологических, геофизических, гидроакустических, газогеохиических, океанологических, батиметрических исследований [1,2], на основе которого строится стратегия поиска газогидратосодержащих площадей, оценки объема газогидратов и потока метана, разработка научной основы извлечения метана из газогидратов[6]. Особое место занимают гидроакустические и газогеохимические критерии изучения и поиска газогидратов. Они служат индикаторами обнаружения газогидратов и потоков пузырей метана из донных отложений в воду[4,5,7]. Важно отметить, что эти два метода можно технически использовать в подводных автономных аппаратах. На подводные роботы прикрепляются гидроакустические датчики, сенсоры определения растворенного в воде метана и батометры для взятия проб воды. Этот комплекс позволит оценить перспективный район распространения газогидратов и нефтегазовых залежей.

Результаты исследований

В исследованиях, выполненных ранее нами и другими исследователями, были даны некоторые оценки количества метана, законсервированного в газогидратах (100-1000 млрд. м^3), их процентного насыщения в донных осадках (около 10-20%), и их экологического влияния на поверхность дна и биоту в воде и донных осадках и оценке участия потока метана в атмосферу на глобальный процесс изменения (потепления) климата. В результате

проведенных исследований, на Сахалинском восточном склоне Охотского моря открыто 500 выходов пузырей метана из донных отложений в воду как на шельфе, так и на Сахалинском восточном склоне Охотского моря и 17 площадей, содержащих в донных осадках газогидратов (рис. 1). Наибольшее выделение метана происходит во время эпизодов землетрясений.

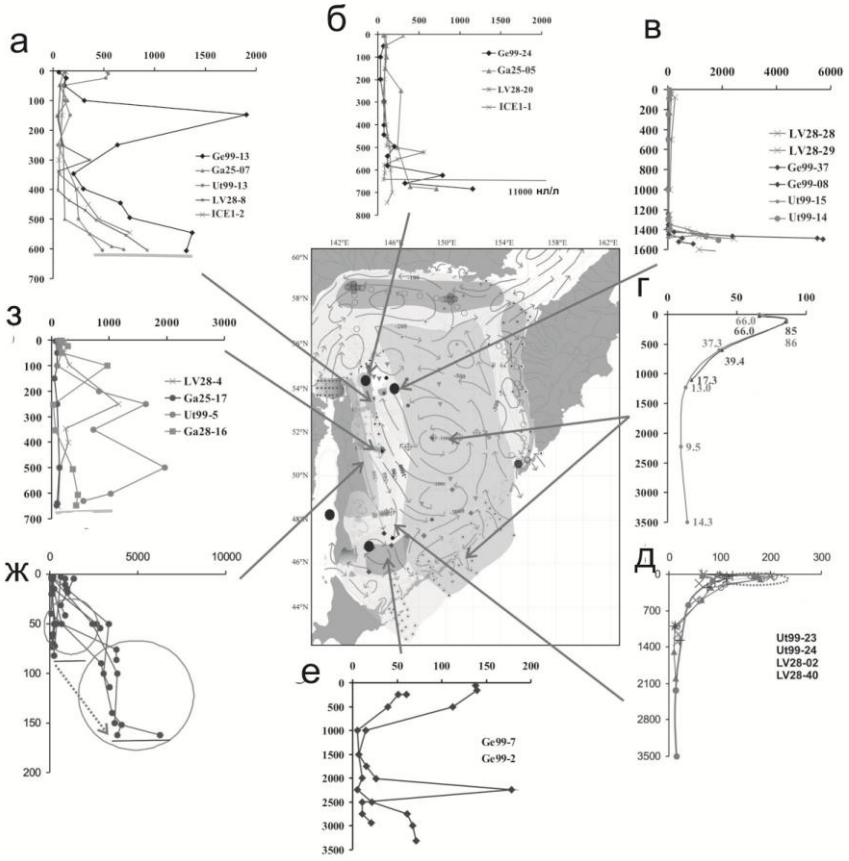


Рис. 1. Характеристики аномальных и фоновых полей метана в различных геологических условиях и структурах в западной части Охотского моря и побережья Сахалина. Черные точки на карте – места обнаружения газогидратов. На графиках на вертикальной оси показана глубина (в м), на горизонтальной – концентрация метана (в нл/л). Горизонтальными черточками на графиках обозначена глубина дна. 1а – аномалии метана в придонном слое воды и в прмежуточных водных горизонтах в районе выхода пузырей метана; 1б и 1в – аномалия метана в придонном слое воды в районе площадей газогидратов; 1г – устойчивые фоновые концентрации метана в районе глубоководной впадины при отсутствии потока метана из донных отложений в воду; 1д - устойчивые подповерхностные повышенные концентрации метана у подножья склона Курильсой котловины; 1е-комбинированный тип повышенных концентраций метана на юго=западном склоне Курильской котловины; 1ж, 1з – аномалии метана на шельфе в воде над разломами Лунского газового месторождения и других нефтегазоносных структур.

Закономерности распространения газогидратов в Охотском море

Для формирования газогидратов необходим газ, вода, низкая температура и высокое давление. В Мировом океане газогидраты обнаружены в основном на склонах окраинных или внутренних морей. Это связано с тем, что в склоновых отложениях этих морей накапливаются донные осадки с повышенным количеством органического вещества и как следствие высоким нефте-газовым потенциалом. Они являются источником как термогенного, так и микробного метана. Кроме того, в морях обычно район перехода из шельфа в склон осложнен зонами разломов, по которым при сейсмо-тектонической активизации могут поступать углеводороды как мантийные, так и из глубоких горизонтов нефте-газсодержащих пород. В этом заключается очень важная закономерность –

сопряженность процессов формирования нефтегазовых месторождений и газогидратов. При этом газогидраты играют роль покрышки и консервации метана и тяжелых углеводородов. Если есть источник метана, то в морях в донных осадках формируются газогидраты на глубинах моря около 400 м и глубже. Глубина моря, на которой могут формироваться газогидраты, зависит от температуры придонной воды в море – чем больше температура, тем большая глубина моря необходима для формирования газогидрата. Уменьшение уровня моря и (или) увеличение температуры придонной воды в море приводят к разрушению газогидратов и выделению в воду и атмосферу большого количества метана.

В газогидратах, обнаруженных в Мировом океане, в том числе в Охотском море, обычно содержится метана 90-95 % и из 1 $см^3$ газогидрата выделяется 170 $см^3$ метана при его разрушении. Процесс диссоциации газогидрата, когда из него начинает выделяться метан, происходит при нарушении условий его стабильного состояния. Это происходит при уменьшении давления и (или) повышения температуры.

Одним из главных вопросов в изучении условий формирования и разрушения газогидратов в Мировом океане и Охотском море является выяснение источников метана, который образует газогидрат в условиях его стабильности при низкой температуре и высоком давлении. До сих пор идет дискуссия, метан, какого генезиса является основным гидрат образующим – или микробный или термогенный метан. Отметим, что это один из важных вопросов, так как от его решения зависит масштаб газогидратообразования и количество содержания в них метана.

В результате наших исследований в Охотском море можно заключить, что основное количество метана, который образуют газогидраты, является термогенный метан нефтегазсодержащих пород и возможно присутствие других источников недр – угольный метан, глубинный метан литосферы. Термогенный метан проникает к поверхности по зонам разломов и в условиях низкой температуры и высокого давления формируют газогидраты. При этом на поверности метан частично перерабатывается микробами в связи с чем, изотопное отношение метана облегчается и его $\delta^{13}C$ изменяется в среднем от -55 до -65‰. Этот вывод очень важен тем, что газогидраты взаимосвязаны с нефтегазовыми залежами, являются хорошими покрышками и консервантами метана. В этом случае запасы метана в газогидратах могут быть очень значительными.

В работе [3] представлен пример формирования газогидратов в районе нефтегазовых залежей на Аляске. Газогидраты обнаружены в районе нефтегазовых месторождений Прадхо Бей и Купарук Ривер. В этом регионе формирование слоев газогидратов взаимосвязаны с нефтегазовыми залежами (Рис. 2а). На этих месторождениях газ из нефтегазсодержащих пород по зоне разлома поднимается вверх и в зоне, благоприятной по давлению и температуре для образования газогидратов, формируются слои газогидратов. Возможно, образование слоев газогидратов способствуют консервации углеводородов, так как они являются не проницаемыми для их миграции на поверхность. То есть, существует непрерывный процесс образования – нефтегазовых залежей и газогидратов. На поверхности дна в районе газогидратов формируются ямки, бугры с локальными относительными превышениями 30-40 м. Нарушения поверхности дна и морфоструктуры, которые образуют газогидраты в донных отложениях, связаны с тем, что они внедряются в осадочные слои и расширяют их. В тоже время, поток метана разрыхляет осадок и вода размвает и выносит его, создаваяямки (рис. 2б).

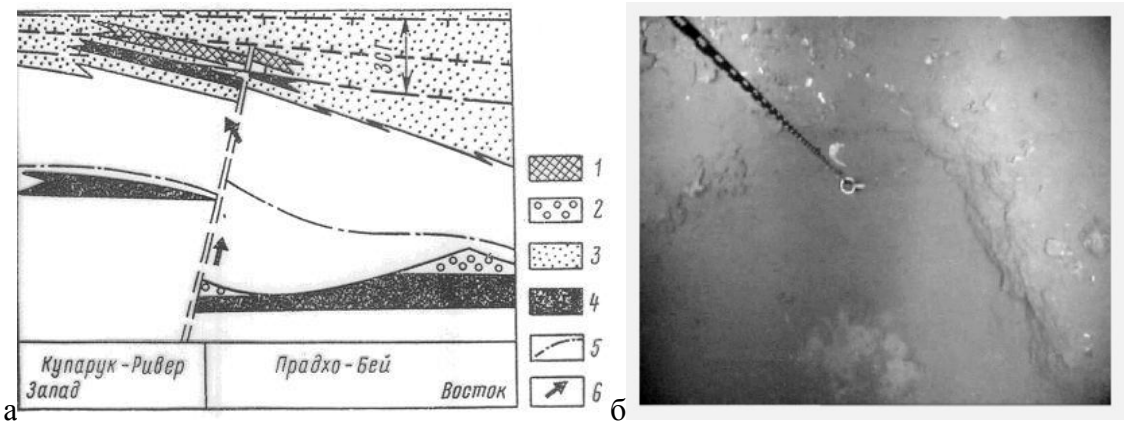


Рис. 2а Схематический разрез [11] гидратсодержащего района месторождений Купарук-Ривер и Прадхо-Бей (Аляска). 1–гидратсодержащие отложения; 2–газовые шапки месторождений; 3–свита Сагаванирктoк (ЗСГ-зона стабильности газогидрата); 4-нефтегазсодержащие отложения; 5–подошва морских сланцев; 6 – направление движения газа. Рис. 2б Покмарк на структуре «Китами», Охотское море (светлое пятно внутри бактериальные маты).

В результате выполнения геолого-геофизического и гидроакустического комплекса исследований было обнаружено 17 структур газогидратов (рис. 3а), которые сопровождались разгрузкой пузырей метана. Наиболее крупными из них являются структуры «Хаос» и «Обжиров». Структура «Хаос» является самой крупной на СВ склоне Сахалина. Она расположена в нижней части склона на глубинах 950-980 м и занимает площадь размером 2000м х 700 м. В пределах этой структуры склон несколько наклонен в сторону впадины Дерюгина. Данные, полученные с помощью локатора бокового обзора, показывают, что структура «Хаос» имеет в плане изометричную форму и характеризуется наибольшей акустической прозрачностью в южной и центральной части, что свидетельствует, по-видимому, о наличии в поровом пространстве осадков свободного газа. Структура представлена группой мелкомасштабных газовых сипов в пределах большого поля газового просачивания, имеющих, вероятно, единой источник газа.

Данные по сейсмоакустическому профилированию, полученные при исследовании структур «ТОИ», «КОПРИ», «Китами» и «Хаос», показали наличие отчетливо видимых разрывных нарушений, которые являются, по всей видимости, газо-флюидопроводниками (Рис. 3б). Осадки в пределах полей газовой разгрузки имеют специфические особенности и отличаются от фоновых отложений рядом признаков. В них наблюдается определенная закономерность в изменении текстур и цвета осадков, распределении аутигенных новообразований (преимущественно карбонатных конкреций), включений раковин специфической хемоаутотрофной фауны моллюсков, а также газовых гидратов в Охотском море (белые слои).

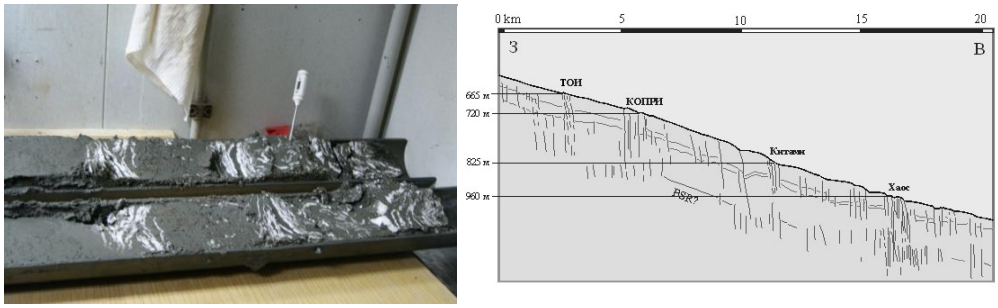


Рис. 3а. Типы газгидратных образований. Рис. 3б. Схематическая интерпретация сейсмического профиля, проходящего через структуры «ТОИ», «КОПРИ», «Китами» и «Хаос». Вертикальные линии характеризуют отсутствие отражающих слоев, что связано с разломами и потоком газа (метана).

Заключение

Газогидраты в Охотском море обнаружены в районе потоков метана из донных отложений в воду. Путями миграции газа (метана) являются зоны разломов, которые в период сейсмо-тектонической активизации раскрывают недра и разрушают нефтегазовые залежи и газогидраты. Аномалии метана, морфоструктуры дна, гидроакустиеские характеристики являются хорошими индикаторами, которые можно использовать при изучении и поиска газогидратов и нефтегазовых залежей в морских условиях. Эффективность применения этих критериев возможно повысить при условии использования подводной роботехники. Для этого есть все технические условия дооборудования подводных автономных аппаратов гидроакустическими и газогеохимическими датчиками.

Литуратура

1. Обжиров А.И. и др. Мониторинг метана в Охотском море. Дальнаука, 2002, 250с.
2. A.Obzhirov, R. Shakirov, A. Salyuk, E. Suess, N. Biebow and A. Salomatin. Relations between methane venting, geological structure and seismo-tectonics in the Okhotsk Sea // Geo-Marine Letters. 2004. V. 24, N. 3. P. 135 – 139.
3. Thomas D. Loranson, Timothy S. Collet, Robert B. Hunter // Marin and Petroleum Geology. 28 (2011) P. 343 - 360.
4. Юсупов В.И., Саломатин А.С., Обжиров А.И. Газогеофизический комплекс для обнаружения подводных выходов газогидратов. Патент № РФ № 70377 U1. 2008. Бюл. № 2.
5. Обжиров А.И., Саломатин А.С., Юсупов В.И. Газогидроакустический комплекс для оценки сейсмоакустической активизации. Патент RU 78333 U1. 2008. Бюл. № 32
6. Обжиров А.И., Тагильцев А.А. Технологический комплекс для разработки газогидратных залежей в Охотском море. Патент № RU 2386015 C1. 2010. Бюл. № 10
7. Обжиров А.И. Способ прогноза залежей углеводородов. Патент № RU 2359290 C1. 2009. Бюл. № 17

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОДУЛИ КОМПЛЕКСА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

А.Г. Островский, В.А. Соловьев, А.Л. Цибульский, Д.А. Швоев

ФГУП ОКБ Океанологической техники РАН[1], ООО «Аквалог»[2],
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН[2]
[1]109387, Москва, ул.Летняя 1/2, тел.: (495) 3502612, факс: (499) 3500329
[2]117997, Москва, Нахимовский просп., 36, тел.: (499) 1246392, факс: (499) 1245983
e-mail: osasha@ocean.ru

Представлены модули измерений гидрофизических и гидрохимических характеристик морской среды с целью контроля за состоянием экосистем в акваториях стационарных объектов добычи и транспортировки углеводородного сырья, а также в целях освещения гидрологических условий хозяйственной деятельности на море.

Организация оперативного мониторинга состояния акваторий морей России в настоящее время становится все более актуальной, с одной стороны, из-за глобальных климатических изменений и, с другой стороны, из-за развития хозяйственной деятельности, а также вследствие роста транспортных перевозок и расширения нефтегазодобывающей деятельности на море. Антропогенный стресс нарушает естественное функционирование морских экосистем, что приводит к последствиям, негативным для морского промысла, и рекреационного состояния регионов.

ОКР «Эко-Дозор» ФЦП "Развитие гражданской морской техники" на 2009 - 2016 годы фокусируется на разработке технических и программных средств для автоматизированных измерений и передачи данных и телеметрической информации в оперативном режиме в составе комплекса экологического многопараметрического комплекса автоматизированного мониторинга (МКАМ). Регламент автоматизированных измерений должен соответствовать показателям Правил контроля качества морских вод (ГОСТ 17.1.3.08-82 Охрана природы. Гидросфера).

МКАМ представляет собой многоуровенный комплекс, в котором предусматривается размещение измерительной аппаратуры на приповерхностных, профилирующих и донных носителях. Основными носителями гидрологических и гидрохимических датчиков служат заякоренные мобильные профилирующие аппараты (ЗМПА) типа Аквалог (Островский и др., 2009, 2013) и притопленные приповерхностные буи, устанавливаемые на горизонтах 15-40 м. Причем притопленные буи предназначены не только для размещения измерительной аппаратуры зондирования приповерхностного слоя моря, но и обеспечивают вертикальное натяжение буйрепа, который служит также ходовым тросом для ЗМПА. Таким образом, притопленный буй с якорным устройством и буйрепом, на котором установлен ЗМПА образует единую систему.

Преимущества такого подхода к построению измерительных модулей МКАМ состоят в нижеследующем:

а) разрабатываются два универсальных носителя измерительной аппаратуры - подповерхностный и профилирующий, что позволяет сберечь трудовые и материальные ресурсы, как на этапе производства, так и в ходе эксплуатации МКАМ;

б) носители имеют модульную конструкцию, позволяющую разместить легкосъемные датчики в нужном положении с учетом особенностей процесса измерений,

в) носители снабжены системой связи с помощью индуктивной врезки в ходовой трос, который представляет собой витой стальной трос в пластиковой оболочке,

г) объединение двух носителей (подповерхностного и профилирующего) в единую систему, позволяет устанавливать эту систему целиком с плавсредства за один выход в море.

На рис. 1 показана структурная схема автоматизированного гидрологического модуля.

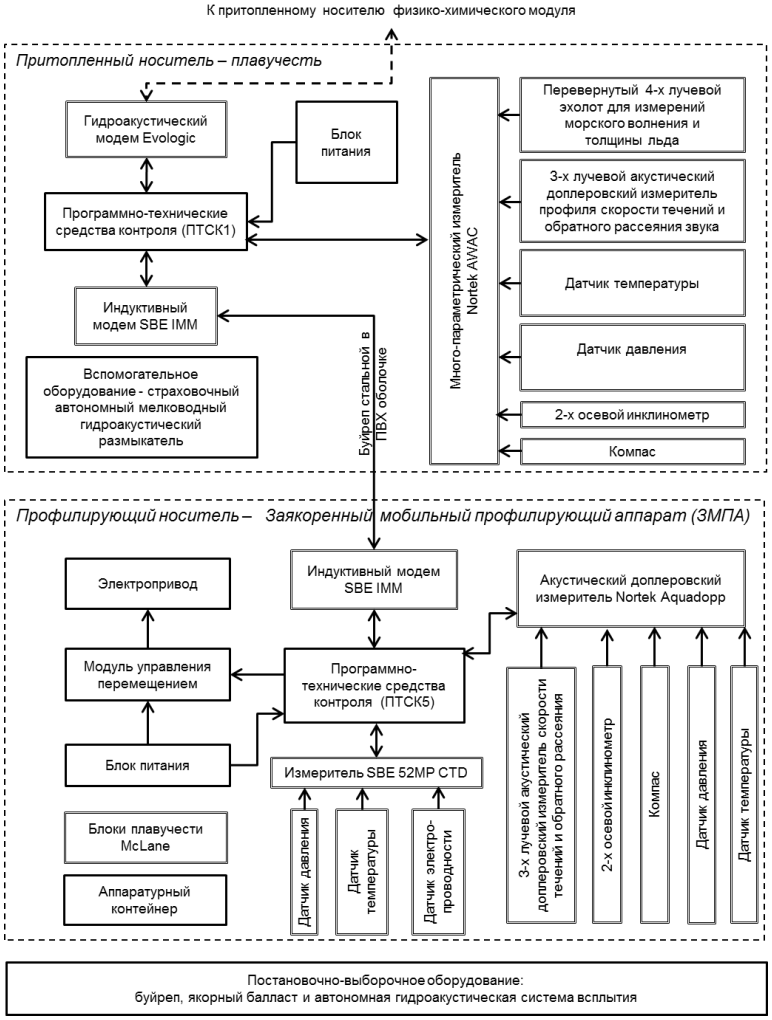


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного модуля гидрологических измерений

Гидрологический модуль позволяет проводить измерения скорости течений, морского волнения и толщины льда с помощью современных систем подводного дистанционного зондирования гидроакустическими средствами. Соответствующие измерительные системы лишены ряда недостатков свойственных контактным средствам измерений. Акустические доплеровские измерители в значительно меньшей степени зависят от биообрастания. Благодаря своему подводному расположению их функционирование не зависит от погодных условий.

Акустический доплеровский измеритель течений типа AWAC установлен в верхней части притопленной плавучести, так чтобы его акустические излучатели были направлены вверх. Этот прибор используется для измерений профилей скорости течения с разрешением 1 м в верхнем слое моря над подповерхностной плавучестью каждые 10-20 мин. С помощью эхолотирования в комбинации с измерением давления столба воды регистрируются период и амплитуд волн на поверхности моря. При наличии ледового покрова, прибор с той же регулярностью 10-20 мин обеспечивает данные о толщине подводной части льда.

В толще воды под притопленной плавучестью до глубины 1000 м вертикальные профили гидрологических характеристик с высоким разрешением измеряются с помощью датчиков установленных на ЗМПА. Этот носитель автоматически со скоростью около 0.2 м/с передвигается по вертикально натянутому тросу (буйрепу) между притопленной плавучестью и донным якорем, поддерживая при этом стабильную ориентацию

относительно направления течения. Пользователь с помощью компьютера может задавать алгоритм автоматических операций профилографа (время запуска, интервал между зондированиями, диапазон профилирования, горизонты остановок, частоту измерений и т.д.) в соответствии с конкретной задачей.

Рис. 2. Заякоренный мобильный профилирующий аппарат с гидрохимическими датчиками и гидроакустическим модемом: слева – вид спереди, справа – вид сбоку.

Автоматизированный модуль гидрохимических измерений (рис. 2) отличается от гидрологического модуля по составу измерительных датчиков (рис. 3). Он также комплектуется поверхностным буем с модемами передачи данных и телеметрической информации по каналам мобильной связи и спутниковой связи.

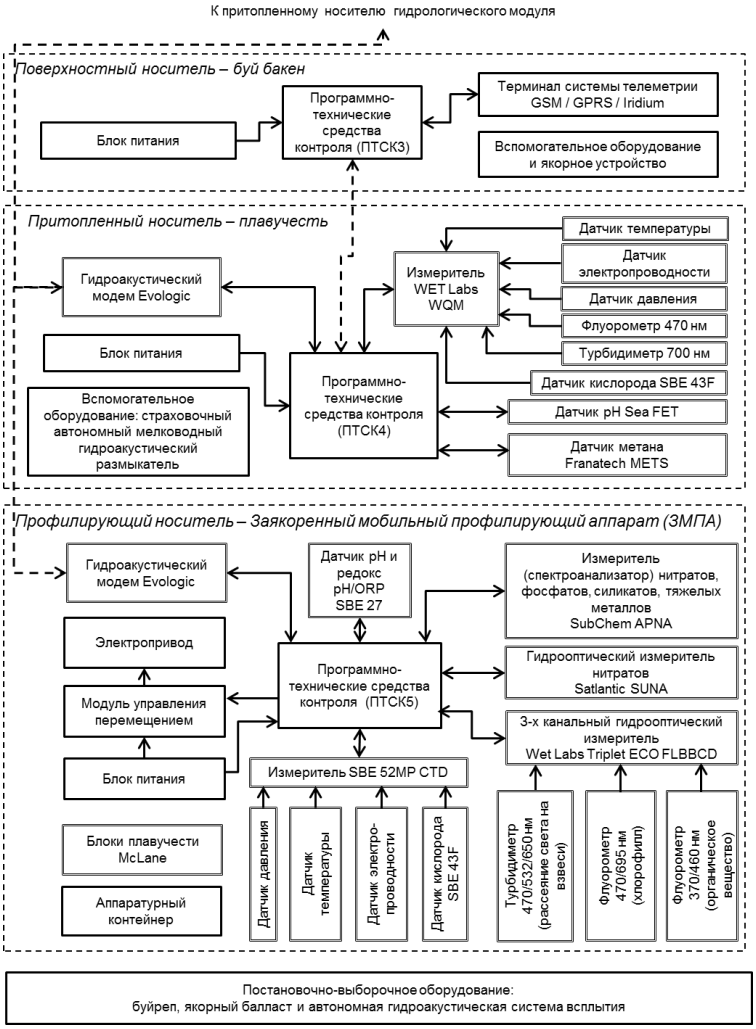


Рис. 3. Структурная схема автоматизированного модуля гидрохимических измерений

Концептуальная схема МКАМ показана на рисунке 4.

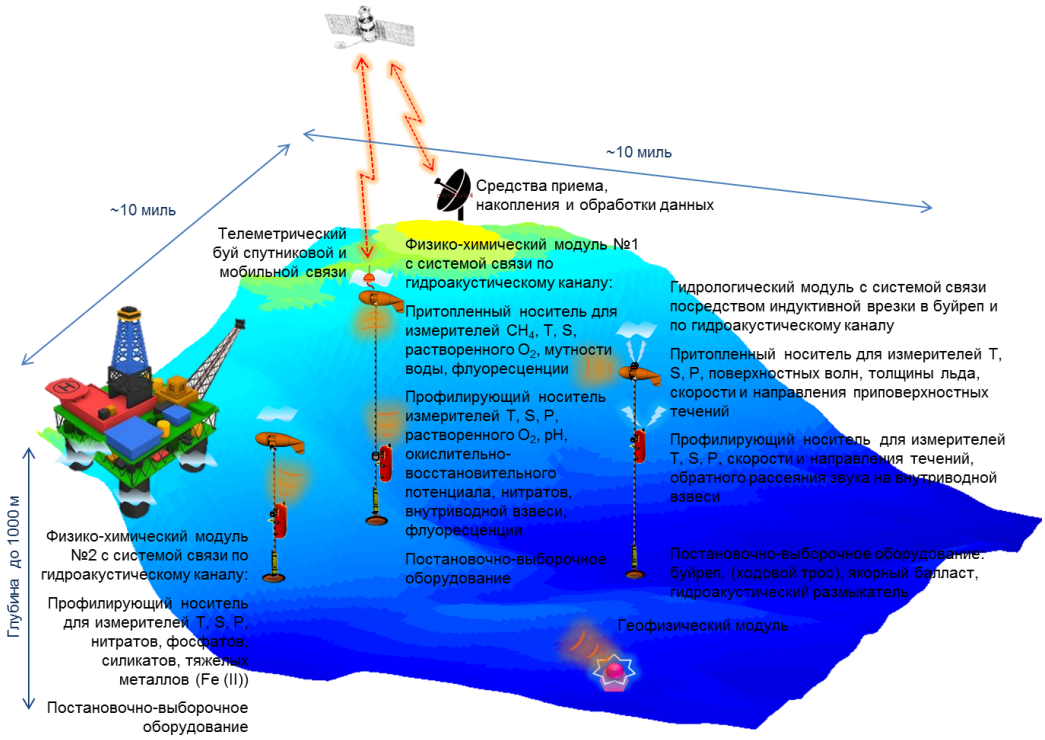


Рис. 4. Схема многопараметрического комплекса автоматизированного мониторинга акваторий

Основной технико-эксплуатационной особенностью МКАМ является автоматический непрерывный режим работы в течение длительного времени. Гидрологические и гидрохимические измерения должны проводиться в любых штормовых условиях.

Эффективность МКАМ определяется минимизацией затрат и трудовых ресурсов на постановку и обслуживание измерительной аппаратуры при многократном увеличении объема данных, получаемых в ходе измерений. МКАМ включает базовые измерительные модули, которые могут быть в дальнейшем расширены и доукомплектованы по желанию заказчика новыми гидрофизическими и гидрохимическими измерительными приборами.

Литература

1. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Иванов В.Н. и др. Заякоренная профилирующая океанская обсерватория // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2/8. С. 50-59.

2. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А. и др. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // Океанология. 2013. Т. 53, № 2, С. 1–10.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА В ДВУХФАЗНОЙ СОПРЯЖЕННОЙ СИСТЕМЕ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПОЛЯРИЗУЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НА МЕЖФАЗНУЮ ГРАНИЦУ

В.А. Немов

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

В докладе рассматривается постановка и решение обобщенной краевой задачи диффузионного массопереноса в двухфазной сопряженной системе электрод- раствор при поляризации электрода любым постоянным потенциалом. Получены и проанализированы оригинальные общие и частные краевые условия (КУ). Показано, что обсуждавшиеся ранее КУ для электродной и растворной асимметрии диффузионного поля являются частными случаями предлагаемого КУ. На основе общего КУ развивается обобщенная теория инверсионной вольтамперометрии - высокочувствительного физико-химического и аналитического метода непосредственного определения тяжелых металлов в морских средах и морских водах, в частности.

Достижение необходимой чувствительности определения микрокомпонентов в морской среде при решении технологических, экологических и технических задач требует совершенствования существующих и разработки новых методов и методик аналитического контроля этих микрокомпонентов. Как уже отмечалось нами ранее [1,2] метод инверсионной вольтамперометрии (ИВ) отвечает требованиям, предъявляемым к физико-химическим методам исследования морской среды. Однако для развития дистантных вариантов методов ИВ необходимо совершенствовать измерительную аппаратуру, электрохимические ячейки и датчики, добиваясь увеличения чувствительности и точности определения, разрешающей способности метода, снижения трудоемкости проведения анализа, автоматизации процедуры анализа и обработки получаемых результатов. Одним из направлений достижения поставленных задач является теоретическое исследование процессов, происходящих на используемых в ИВ рабочих электродах, на основе математического моделирования этих процессов[3]. Так как процессы на электродах в ИВ в основном контролируются диффузией, то строится физическая модель процесса, а на её основе формируется математическая модель в виде краевой диффузионной задачи [4].

Ранее нами рассмотрены математические модели частных несимметричных диффузионных систем с электродной асимметрией [3] и растворной асимметрией [4] диффузионного поля. Решение частных краевых задач позволило получить в явном виде уравнения для концентраций C(x,t) окисленной (O) и восстановленной (R) форм электродноактивного вещества в виде функциональных зависимостей от текущего и равновесного потенциалов электрода и его линейных размеров; дополнительные краевые условия (ДКУ), связывающие соответствующие поверхностные (C_R^S, C_O^S) и объемные (C_R^0, C_O^0) концентрации этих веществ; уравнения вольтамперных кривых при потенциостатической и потенциодинамической поляризации рабочих пленочных электродов [3].

В настоящей работе рассматриваются результаты постановки и решения обобщенной краевой задачи диффузионного массопереноса из слоя (пленки) электрода толщиной ℓ_Rв слой раствора толщиной ℓ_O(и наоборот). при наложении постоянной разности потенциалов на межфазную границу раздела электрод - раствор. Допускается, что величины ℓ_Rи ℓ_O могут принимать значения в интервале (0 - ∞). Сформулируем краевую задачу.

Пусть протекает обратимый электродный процесс Me (Hg) ↔ Me^{z+} + zē или в общем виде R ↔ O + zē на плоском ртутном пленочном электроде при любом постоянном потенциале. При этом массоперенос, контролируемый исключительно диффузией,

осуществляется из области существования вещества R толщиной ℓ_R в область существования вещества O толщиной ℓ_0. Принимаем, что коэффициенты диффузии (D)веществ R и O и коэффициенты их активности не зависят от концентрации. Диффузия в областях R и O принимается линейной и одномерной. Для нахождения зависимости концентраций веществ R и O от времени и толщины электродной пленки и раствора, соответственно, решаем систему уравнений нестационарной линейной диффузии

$$\frac{\partial C_R(x,t)}{\partial t} = D_R \frac{\partial^2 C_R(x,t)}{\partial x^2}, \frac{\partial C_O(y,t)}{\partial t} = D_O \frac{\partial^2 C_O(y,t)}{\partial y^2}, \quad (1)$$

с начальными (t = 0)

$$C_R(x,0) = C_R^0 (0 \le x \le \ell_R);\ C_O(y,0) = C_O^0\ (0 \le y \le \ell_0) \quad (2)$$

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

и граничными (t> 0) условиями:

$$\text{а)}\ D_R \frac{\partial C_R(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=\ell_R} = 0, \text{б)}\quad D_O \frac{\partial C_O(y,t)}{\partial y}\Big|_{y=\ell_0} = 0,$$

$$\text{в)}\quad D_O \frac{\partial C_O(y,t)}{\partial y}\Big|_{y=0} = D_R \frac{\partial C_R(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=0}, \quad (3)$$

где: E – электродные потенциалы: E_p – равновесный, E^0 – стандартный, E – потенциал поляризации электрода.

Условие (2) указывает на равномерность распределения R и O перед началом инверсионного процесса. Граничные условия (3а) и (3б) отражают отсутствие потоков на границах: ртутная пленка- подложка и раствор – стенка ячейки, соответственно. Граничное условие (3в) характеризует равенство потоков веществ R и O к поверхности электрода. В обратимом электродном процессе скорости прямой и обратной электродных реакций высоки, поэтому при поляризации электрода равновесие устанавливается практически мгновенно. В таком случае в качестве граничного условия можно применять уравнение Нернста в трансформированном виде (3г). Строго говоря условие (3а) может нарушаться, если в качестве подложки для ртутного пленочного электрода (РПЭ) используется материал, растворяющийся в ртути. Однако величина потока через границу ртуть – подложка во много раз меньше, чем величина потока через поверхность электрод-раствор, поэтому потоком через подложку можно пренебречь.

Решение краевой задачи (1)–(3) выполнено операционным методом [5].В пространстве изображений решения для концентраций вещества R($\bar{C}_R(x,s)$) и вещества O ($\bar{C}_O(y,s)$) получаются в виде

$$\bar{C}_R(x,s) = \frac{\bar{C}_R^0}{s} - \frac{(\theta' C_R^0 - \zeta \cdot C_O^0)}{s} \cdot \left[\frac{th\,\ell_O\sqrt{s/D_O}}{\theta' th\,\ell_O\sqrt{s/D_O}} - \frac{\frac{ch\,(x-\ell_R)\sqrt{s/D_R}}{ch\,\ell_R\sqrt{s/D_R}}}{th\,\ell_R\sqrt{s/D_R}} \right] \quad (4)$$

$$\bar{C}_O(y,s) = \frac{\bar{C}_O^0}{s} + \frac{\xi(\theta' C_R^0 - \zeta C_O^0)}{s} \left[\frac{th\,\ell_R\sqrt{s/D_R}}{\theta' th\,\ell_O\sqrt{s/D_O}} - \frac{\frac{ch\,(y-\ell_O)\sqrt{s/D_O}}{ch\,\ell_O\sqrt{s/D_O}}}{th\,\ell_R\sqrt{s/D_R}} \right] \quad (5)$$

В уравнениях (4) и (5) ch(x) и th(x) –гиперболический косинус и тангенс, соответственно, s – переменная в пространстве изображений, $\theta' = \theta \cdot \zeta = \theta \cdot \sqrt{(D_0/D_R)}$.

Домножив левую и правую части уравнения (4) на $\sqrt{D_R}$, а уравнения (5) - на $\sqrt{D_0}$ и приняв в (4) x=0, а в (5) y=0 складываем левые и правые части полученных уравнений.

Получаем в пространстве изображений общее краевое условие несимметричной линейной диффузии

$$D_R^{½}\cdot\bar{C}_R(0,s) + D_O^{½}\cdot\bar{C}_O(0,s) = D_R^{½}C_R^O/s + D_O^{½}C_O^O/s \; -$$
$$-D_R^{½}C_R^O(\Theta' - \Theta_0')/\,s\cdot[(1-\frac{th\,\ell_R\sqrt{s/D_R}}{th\,\ell_O\sqrt{s/D_O}})\Big/(\Theta' - \frac{th\,\ell_R\sqrt{s/D_R}}{th\,\ell_O\sqrt{s/D_O}})] \qquad (6)$$

После выполнения обратной трансформации Лапласа [5] дополнительное краевое условие запишется в виде

$$D_R^{½}\cdot C_R^S + D_O^{½}\cdot C_O^S = D_R^{½}C_R^O + D_O^{½}C_O^O - D_R^{½}C_R^O(\Theta' - \Theta_0')\,[\,(æ-1)/(æ\cdot\Theta'-1) +$$
$$+\,2\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos\mu_n\cdot\cos æ\mu_n\cdot\sin(1-æ)\mu_n}{\mu_n\cdot(æ\cdot\Theta'\cdot\cos^2\mu_n-\cos^2 æ\cdot\mu_n)}\cdot\exp(-\mu_n^2\cdot\frac{D_R.t}{\ell_R^2})\,] \qquad (7)$$

Здесь μ_n– корни трансцендентного уравнения $\tan\mu_n - \Theta'\cdot\tan æ\cdot\mu_n = 0$;
$C_R^S = C_R(0,t), C_O^S = C_O(0,t)$; æ - критерий диффузионной асимметрии (КДА)полей в областях R и O: $æ = \ell_O\cdot\sqrt{D_R}/\ell_R\cdot\sqrt{D_O}$ (8)

Уравнение (7) является общим краевым условием линейной диффузии, справедливым для любых толщин активной пленки электрода (например, ртутной) и раствора, для любого значения постоянного потенциала электрода и для любых соотношений начальных концентраций(любого начального потенциала)и коэффициентов диффузии веществ R и O в случае обратимого электродного процесса, контролируемого только свободной диффузией и протекающей в соответствии со схемой: R ↔ O + zē.
Проанализируем уравнение (7) и покажем принципиальную возможность исследования и анализа полученного нами в пространстве изображений выражения (6). В частном случае при $\frac{\ell_O}{\sqrt{D_O}} = \frac{\ell_R}{\sqrt{D_R}}$ в уравнении (6) третье слагаемое правой части обращается в ноль и остается выражение

$$D_R^{½}\cdot\bar{C}_R(0,s) + D_O^{½}\cdot\bar{C}_O(0,s) = D_R^{½}C_R^O/S + D_O^{½}C_O^O/s, \qquad (9)$$

оригинал, от которого записывается в виде [5]

$$D_R^{½}\cdot C_R^S + D_O^{½}\cdot C_O^S = D_R^{½}C_R^O + D_O^{½}C_O^O\,. \qquad (10)$$

С другой стороны, если в уравнении (7) æ = 1, то оно упрощается также до уравнения (10).Это уравнение известно как краевое условие симметричной полубесконечной диффузии. Шевчик [6] использовал его для развития теории вольтамперометрии в случае симметричной полубесконечной диффузионной системы.

Учитывая, что при æ = 1 диффузионная сопряженная система является симметричной, то исходя из КДА можно выделить два крайних состояния её симметрии: полубесконечно – полубесконечную (ℓ_O и $\ell_R \dashrightarrow \infty$) и ограниченно- ограниченную (ℓ_O и $\ell_R \dashrightarrow 0$). Как следует из уравнения (8) коэффициенты диффузии D_R и D_O оказывают существенное влияние на диффузионные свойства рассматриваемой сопряженной системы. Однако довольно часто для упрощения решения краевой задачи исследователи пренебрегают различиями междуD_R и D_O и получают решения с определенной степенью приближения. Краевое условие (10) получено нами двумя путями: на основании анализа общего краевого условия в пространстве изображений (6) и из общего краевого условия в пространстве оригиналов (7). Это обстоятельство позволило нам провести анализ общего краевого условия (6) в пространстве изображений, и рассмотреть частные решения, вытекающие из него, при определенных значениях критерия диффузионной асимметрии. Полученные таким образом частные краевые условия сравнивались с краевыми условиями, полученными путем решения специально поставленных краевых задач. Примем в уравнении (6) в соответствии с

условием (8), что в случае тонкослойной несимметричной системы $\frac{\ell_R}{\sqrt{D_R}} \dashrightarrow 0$ и $\frac{\ell_O}{\sqrt{D_O}} \dashrightarrow 0$, s⇢ 0 (t⇢∞ в пространстве оригиналов), $\neq 1$. Учитывая, что $\lim_{x \dashrightarrow 0} \mathrm{thx} = x$, ограничимся первыми членами разложения в ряд гиперболических тангенсов в уравнении (6). После обратной трансформации Лапласа [5] получаем

$$D_R^{½} \cdot C_R^S + D_O^{½} \cdot C_O^S = D_R^{½} C_R^O + D_O^{½} C_O^O - D_R^{½} C_R^O (\theta' - \theta_0') \, [\, (æ - 1)/(æ \cdot \theta' - 1)] \tag{11}$$

Уравнение (11) представляет собой краевое условие ограниченно - ограниченной несимметричной диффузии, описывающее диффузию из тонкого слоя толщиной ℓ_Rв тонкий слой толщиной ℓ_O при поляризации межфазной границы постоянным потенциалом любой величины. Нетрудно убедиться в том, что уравнение (11) также получается в предельном частном случае из общего краевого условия(7) в пространстве оригиналов.

Критерий может изменяться в интервале от 0 до ∞. Если æ = 1, то имеем дело с диффузионно-геометрической симметрией. Если 0 ≤ æ <1, то имеем дело с растворной асимметрией (область O ограничена, а область R достаточно велика вплоть до ∞). Если же1 < æ ≤ ∞, то имеем дело с электродной асимметрией (область R ограничена, а область O достаточно велика вплоть до ∞). Если æ ≫1, то из уравнения (11)получаем ещё более частное, но важное краевое условие

$$D_R^{½} \cdot C_R^S + D_O^{½} \cdot C_O^S = D_R^{½} C_R^O + D_O^{½} C_O^O - D_R^{½} C_R^O (\theta' - \theta_0')/\, \theta'. \tag{12}$$

В случае растворной асимметрии æ < 1 (ℓ_R⇢∞, а ℓ_O принимает любые, отличные от нуля, значения). Учитывая, что$\lim_{x \dashrightarrow \infty} \mathrm{thx} = 1$ упрощаем уравнение (6) к виду

$$D_R^{½} \cdot \bar{C}_R(0,s) + D_O^{½} \cdot \bar{C}_O(0,s) = D_R^{½} C_R^O/s + D_O^{½} C_O^O/s - \\ - D_R^{½} C_R^O (\theta' - \theta_0')/S \cdot [(th\, \ell_O \sqrt{s/D_O} - 1)/(\theta' th\, \ell_O \sqrt{s/D_O} - 1)] \tag{13}$$

Переходя в пространство оригиналов [5] получаем краевое условие несимметричной полубесконечно-ограниченной диффузии (растворная асимметрия)

$$D_R^{½} \cdot C_R^S + D_O^{½} \cdot C_O^S = D_R^{½} C_R^O + D_O^{½} C_O^O + 2 D_R^{½} C_R^O \cdot B \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-K)^{n-1} \cdot erfc(n \ell_O / \sqrt{D_O . t}) \tag{14}$$

где: $K = (1-\theta')/(1+\theta')$; $B=(\theta' - \theta_0')/(1+\theta')$; erfc(x) – функция, дополнительная к функции ошибок.

Уравнение (14) полностью совпадает с уравнением, полученным нами ранее при решении специально поставленной краевой задачи для растворной асимметрии [4]. Краевое условие (14) описывает диффузионный процесс переноса вещества из слоя ℓ_Rбесконечной толщины в слой толщиной ℓ_O или наоборот в зависимости от знака параметра $B=(\theta' - \theta_0')/(1+\theta')$.

Учитывая в (13), что $\lim_{x \dashrightarrow 0} \mathrm{thx} = x$и переходя к оригиналам [5] находим для небольшихℓ_O частное краевое условие растворной диффузионной асимметрии

$$D_R^{½} \cdot C_R^S + D_O^{½} \cdot C_O^S = D_R^{½} C_R^O + D_O^{½} C_O^O + \\ + D_R^{½} C_R^O \cdot \frac{\theta' - \theta_0'}{\theta'} \cdot \left[\theta' - (1+\theta') \exp\left[\frac{D_O \cdot t}{\ell_O^2 \cdot (\theta')^2}\right] \cdot erfc\,(\sqrt{D_O . t})/(\ell_O \cdot \theta')\right]. \tag{15}$$

При ℓ_O ⇢ 0 из (6), (14) и (15) получаем еще одно частное предельное краевое условие

$$D_R^{½} \cdot C_R^S + D_O^{½} \cdot C_O^S = D_R^{½} C_R^O + D_O^{½} C_O^O + D_R^{½} C_R^O \cdot (\theta' - \theta_0'). \tag{16}$$

В случае электродной асимметрии $1 < æ \leq \infty$. Принимая, что $\lim_{x\to\infty} \text{thx} = 1$, упрощаем уравнение (6) к виду

$$D_R^{½}\cdot\bar{C}_R(0,s) + D_O^{½}\cdot\bar{C}_O(0,s) = D_R^{½}C_R^O/s + D_O^{½}C_O^O/s -$$
$$- D_R^{½}C_R^O(\Theta' - \Theta_0')/S\cdot [(1 - th\,\ell_R\sqrt{s/D_R})/(\Theta' - th\,\ell_R\sqrt{s/D_R})]. \quad (17)$$

Обратная трансформация Лапласа приводит к уравнению в пространстве оригиналов [5]

$$D_R^{½}\cdot C_R^S + D_O^{½}\cdot C_O^S = D_R^{½}C_R^O + D_O^{½}C_O^O - 2D_R^{½}C_R^O\cdot B\cdot\sum_{n=1}^{\infty}(K)^{n-1}\cdot erfc\left(\frac{n\ell_R}{\sqrt{D_R.t}}\right). \quad (18)$$

Но к такому же уравнению мы приходим решая специально поставленную частную задачу для электродной асимметрии [3]. Уравнение (18) представляет собой краевое условие ограниченно-полубесконечной линейной диффузии вещества R из пленки толщиной ℓ_R в раствор, толщина которого близка ∞. Оно же применимо и для обратного процесса, когда вещество O будет переходить из раствора в пленку толщиной ℓ_R. Направление процесса определяется знаком величины $B = (\Theta' - \Theta_0') / (1 + \Theta')$, т.е. относительной разностью поляризующего и равновесного потенциалов рабочего электрода.

Как и в случае растворной асимметрии при электродной асимметрии кроме краевого условия (18)получаются более частные краевые условия. При $x \to 0$ можно с точностью до 1% ограничиться первым членом разложения в ряд функции th(x) в уравнении (17). Тогда в пространстве изображений частное краевое условие запишется

$$D_R^{½}\cdot\bar{C}_R(0,s) + D_O^{½}\cdot\bar{C}_O(0,s) = D_R^{½}C_R^O/s + D_O^{½}C_O^O/s -$$
$$\frac{-D_R^{½}C_R^O(\Theta'-\Theta_0')}{s}\cdot\left[\left(1 - \ell_R\sqrt{s/D_R}\right)/\left(\Theta' - \ell_R\sqrt{s/D_R}\right)\right]. \quad (19)$$

Продолжая упрощать(19) далее получаем при $\ell_R \to 0$

$$D_R^{½}\cdot\bar{C}_R(0,s) + D_O^{½}\cdot\bar{C}_O(0,s) = D_R^{½}C_R^O/s + D_O^{½}C_O^O/s - D_R^{½}C_R^O(\Theta' - \Theta_0')/\Theta'\cdot s. \quad (20)$$

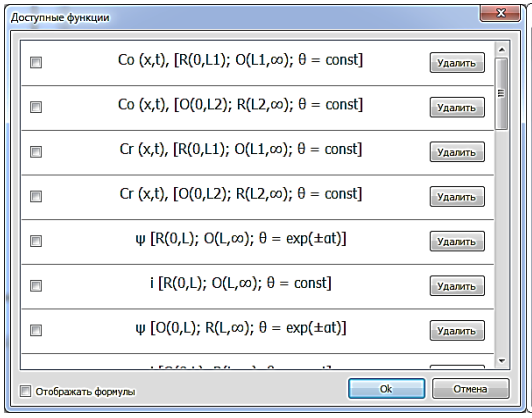
В пространстве оригиналов[5]уравнение (19) запишется в виде:

$$D_R^{½}\cdot C_R^S + D_O^{½}\cdot C_O^S = D_R^{½}C_R^O + D_O^{½}C_O^O -$$
$$-\frac{D_R^{½}C_R^O(\Theta'-\Theta_0')}{\Theta'}\left[1 - (1+\Theta')\exp\left((\Theta'^2\cdot D_R.t/\ell^2)\cdot erfc\left(\frac{\Theta'}{\ell_R}\sqrt{D_R.t}\right)\right)\right], \quad (21)$$

а уравнение (20) - в виде:

$$D_R^{½}\cdot C_R^S + D_O^{½}\cdot C_O^S = D_R^{½}C_R^O + D_O^{½}C_O^O - \frac{D_R^{½}C_R^O(\Theta'-\Theta_0')}{\Theta'}. \quad (22)$$

Как отмечалось выше, предлагаемые краевые условия имеют самостоятельное значение так как позволяют рассчитать и оценить концентрационные профили окисленной и восстановленной форм электродноактивного вещества в сопряженной системе электрод-раствор при наложении электродного потенциала. Для проведения расчетов разработана компьютерная программа [7]. В соответствии с окном выбора функции (Рис. 1) программа позволяет рассчитывать величины тока в потенциостатической ИВ, промежуточные функции ψ для линейной потенциодинамической ИВ (ЛПД ИВ)(Рис.2)[3], концентрационные профили веществ R и O (Рис. 3 и Рис. 4),



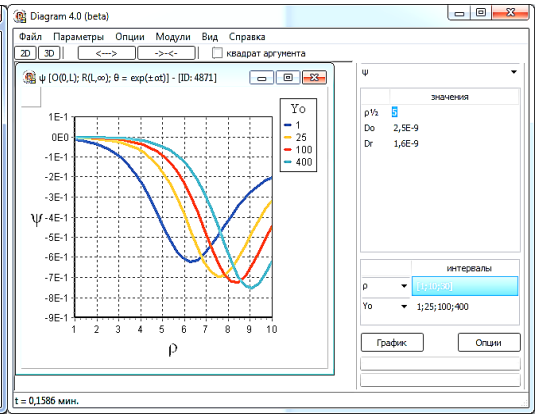
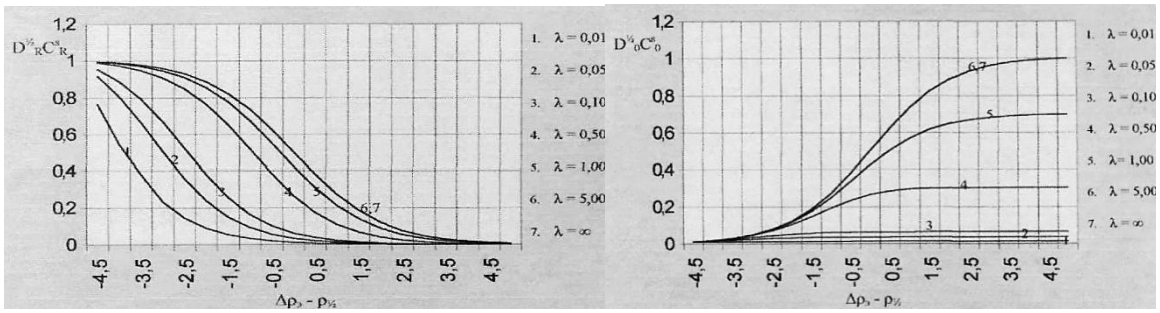


Рис.1. Окно выбора функции

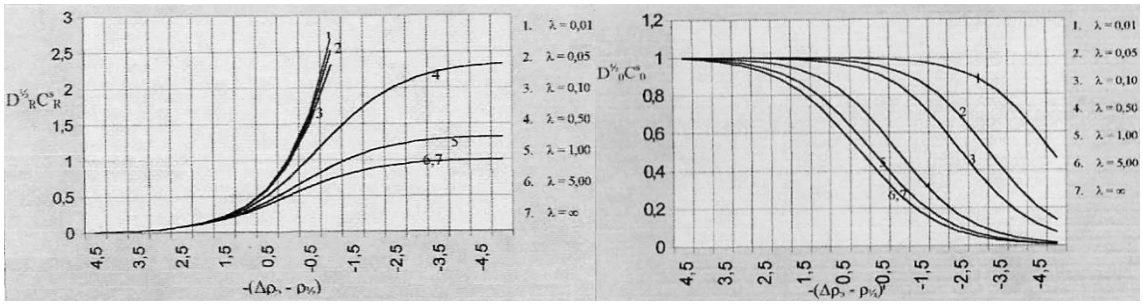
Рис.2. Главное окно программы
Пример расчета функции ψ в ЛПД ИВ

На рис.3 приведены результаты расчетов концентрационных профилейпо уравнению (18) для анодного процесса, а на рис.4– для катодного процесса.



а) б)

Рис 3. Зависимость $D_R^{1/2}\cdot C_R^S$ (а) и $D_O^{1/2}\cdot C_O^S$(б)от потенциала в безразмерном виде для различных λ_R (анодный процесс)



а) б)

Рис 4. Зависимость $D_R^{1/2}\cdot C_R^S$(а) и $D_O^{1/2}\cdot C_O^S$(б)от потенциала в безразмерном виде для различных λ_R (катодный процесс)

Расчеты показывают, что ограниченность диффузионного поля в электроде (параметр $\lambda_R = \ell_R/\sqrt{D_R.t}$ изменяется от ∞ до 0,01) существенно влияет на концентрационные профили веществ R и O как в анодном, так и в катодном процессах. Но это означает, что ограниченность диффузионных полей в электроде и растворе должна существенно повлиять на характеристики вольтамперных кривых в методах вольтамперометрии и инверсионной вольтамперометрии (ИВ), в частности. На рис. 2 показаны результаты некоторых расчетов для линейной потенциодинамической инверсионной вольтамперометрии (ЛПД ИВ), которые хорошо согласуются с нашими ожиданиями.

Особо следует подчеркнуть, что обсуждаемые выше новые краевые условия предлагается использовать в качестве дополнительных краевых условий (ДКУ) при решении краевых задач с целью разработки теории вольтамперных кривых в условиях общей асимметрии диффузионной системы электрод – раствор или в условиях реализации её частных случаев (электродная и растворная асимметрии). Как уже отмечалось ранее [3] использование метода ДКУ позволяет получать уравнения вольтамперных кривых в явном виде, что значительно упрощает их анализ и организацию вычислительного процесса.

Литература

1. Немов В.А. Методы определения микрокомпонентов в морской воде. Сб. международных научных чтений «Приморские зори- 2001г. Экология, безопасность жизнедеятельности, охрана труда и устойчивое развитие». Вып.1,Владивосток, 2001, С.110 – 111.
2. Немов В.А. Контроль тяжелых металлов в морской воде методом инверсионной вольтамперометрии. Материалы VII Всероссийской конференции по электрохимическим методам анализа с международным участием «ЭМА-2008». Изд-во ГУП НИИ БЖД РБ, Уфа, 2008,С.84.
3. 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 2009г. С.256-261.
4. Немов В.А., Калиновский И.А. Моделирование концентрационных профилей электродноактивных веществ в несимметричном диффузионном поле в условиях потенциостатической поляризации электрода // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана», Владивосток, 3-7 октября 2011г. С.215-219.
5. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z – преобразования. – М.: Наука. – 1971.
6. Ševčik A., Collect. Czech. Chem. Comm. **13**, 349 (1948).
7. Калиновский И.А., Немов В.А. Программа расчета и анализа концентрационных профилей и вольтамперных кривых в методе потенциостатической и линейной потенциодинамической инверсионной вольтамперометрии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012615032 от 06.06.2012г.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ГЕНЕРИРОВАНИЕ ИЗ МОРСКОЙ ВОДЫ СООСАДИТЕЛЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ

В.А. Немов

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

В докладе приводятся экспериментальные результаты по электрохимическому генерированию из морской воды гидроксида магния и его использованию для соосаждения находящихся в морской воде микроэлементов. Исследовано влияние различных факторов на степень извлечения микроэлементов и определена эффективность процесса соосаждения для использования в качестве метода концентрирования микроэлементов и консервирования отбираемых проб морской воды.

Прямое (insitu) определение содержания микроэлементов в морской воде (МВ) обычно ограничено недостаточной чувствительностью большинства известных физико-химических методов анализа и непригодностью их применения в сложных условиях полевых и морских экспедиций. Поэтому традиционным остается метод дискретного отбора проб МВ с последующим их консервированиеми концентрированием. Для консервации отобранных проб и для концентрирования микроэлементов в пробах используют различные химические, экстракционные и сорбционные методы. Реализация этих методов требует, как правило, специальных и особо чистых реактивов, подготовка и использование которых в экспедиционных условиях связаны со значительными экспериментальными трудностями.

Этот недостаток может быть устранен, если в качестве концентратора микроэлементов использовать гидроксид магния, обладающий хорошими сорбционными свойствами [1,2], и легко осаждаемый из МВ при её подщелачивании. Свежеосажденный гидроксид магния предлагали использовать для очистки МВ от свинца и цинка [3], для предварительного концентрирования марганца с целью его последующего аналитического определения [4]. Однако химическое генерирование гидроксида магния не получило широкого распространения в практике концентрирования микроэлементов из МВ, т.к. добавление щелочи (даже квалификации «осч») в исследуемую пробу приводит к её загрязнению, соизмеримому, а по некоторым микроэлементам (ртуть, серебро, свинец) превышающему истинное содержание их в пробе. Опасность загрязнения исследуемых проб можно устранить, если гидроксид магния получать не химическим, а электрохимическим подщелачиванием. Схематично процесс ионизации воды можно представить в виде

$$H_2O \leftrightarrow H^+ + OH^- . \qquad (1)$$

При электролизе на катоде ионы водорода восстанавливаются до молекулярного водорода, $2H^+ + 2e = H_2$ (2), а за счет избытка гидроксид-ионов происходит подщелачивание прикатодного раствора (католита). В результате в прикатодномпространстве образуется гидроксид магния (оксигидрат магния) по схеме:

$$Mg^{2+} + 2OH^- + 2\,H_2O = Mg(OH)_2 \cdot 2H_2O, \qquad (2)$$

а на аноде выделяется хлор, который подвергают утилизации, пропуская через раствор щелочи. При этом получается великолепный отбеливатель – гипохлорит натрия или калия.

Полученный при электрохимической активации МВ гидроксид магния не содержит дополнительных примесей (при соответствующем подборе электродов) и обладает фильтруемостью лучшей, чем осажденный химически. Так как при электрохимическом получении гидроксида магния в него «захватывается» достаточно большой набор

микроэлементов и степень их концентрирования достигает 10^2-10^3, то подобное предварительное концентрирование можно было бы использовать в трех направлениях:

1) в качестве удобной промежуточной операции для концентрирования микроэлементов из морской воды с последующим анализом проб нейтронно-активационным, атомно-абсорбционным (ААС), инверсионно-вольтамперометрическим или другими методами[5];

2) в качестве эффективного метода консервирования проб МВ для длительного хранения;

3)в качестве основной операции для удаления токсичных (тяжелых) металлов из сточных вод (например, гальванических цехов предприятий) или радиоактивных элементов при авариях на морских или приморских АЭС или других подобных объектах.

Разумеется эти направления могут быть успешно реализованы при наличии достаточного количества МВ, например: в городах и поселках, расположенных на морском побережье;на морских судах в океанологических экспедициях;при гидрохимических исследованиях.

Методика исследований

Нефильтрованная или отфильтрованная от взвешенных частиц на ультрафильтре исследуемая проба МВ заливалась в электрохимическую ячейку для электролиза, где в качестве анода использовался спектрально чистый графит, а в качестве катода - платиновая жесть. Электролиз МВ проводили постоянным током при перемешивании. После электролиза католит из прикатодного пространства откачивался вакуумным насосом через ультрафильтр. Образовавшийся в католите гидроксид магния отделялся от фильтра полиэтиленовой лопаткой, высушивался при 110◦С и помещался в специально подготовленные и тщательно отмытые в соляной кислоте контейнеры из полиэтиленовой пленки (фото 1 и фото 2). В них пробы могут храниться сколь угодно долго и легко транспортироваться в стационарные лаборатории для определения микроэлементов соответствующими методами. Каждая такая законсервированная проба соответствовала 2дм^3 свежей МВ. Для предотвращения загрязнения пробы и гидроксида в процессе эксперимента принимались все предосторожности, необходимые при проведении такого рода работ. Ячейка и электроды перед каждым опытом промывались 0,1М HCl (осч), приготовленной на бидистиллате. Использование металлических предметов исключалось. От попадания примесей из воздуха и из мешалки электролизер защищался крышкой.

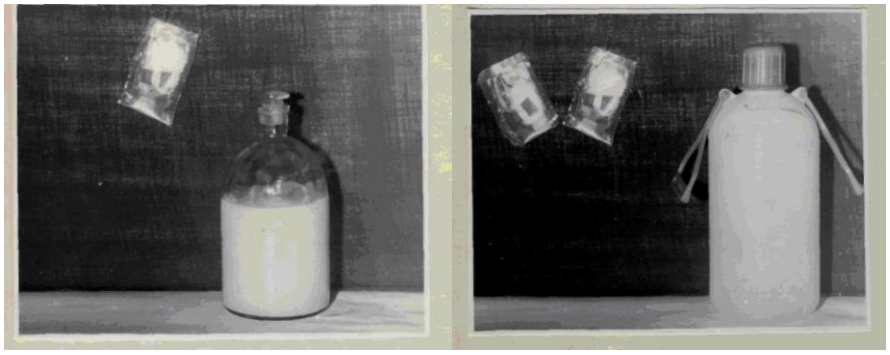


Рис. 1. Пробы морской воды в обычном состоянии (справа – V = 2л) и законсервированном (слева – m = 2г) соосаждением с гидроксидом магния (2 контейнера с mосадка по 3г в каждом)

Рис. 2. Пробы морской воды законсервиро--ванные подкислением (V=5л) и

Пробы МВ отбирали с поверхности залива Петра Великого, а также с поверхности и глубины (10 – 50 м) открытой части Японского моря. Для оценки сорбционной способности гидроксида магния использовали чистую МВ иту же воду с добавлением в неё 20 и 60

мкг/дм^3 различных микроэлементов. Все эксперименты проводились с трехкратной повторяемостью. Воспроизводимость результатов аналитических определений была не ниже 15%.

Основные данные по содержанию микроэлементов в осажденном оксигидрате в зависимости от его массы, природы и концентрации микроэлемента в исследуемой пробе при 20˚С представлены в таблице 1.

Таблица 1. Содержание микроэлементов в чистой МВ и в МВ с добавками микроэлементов

Проба	Масса осадка, г	Кол-во электри-чества, Кл	Содержание Ме в оксигидрате,мкг					
			Cu	Pb	Cd	Zn	Mn	Fe
Вода с поверхности залива Петра Великого, предварительно фильтрованная	0,14	360	0,6	1,6	0,3	2,2	1,0	7,8
	0,35	720	1,1	3,0	0,6	4,4	2,2	9,6
	0,65	1440	1,8	5,1	0,9	7,1	3,7	11,0
	1,26	2880	2,2	6,4	1,2	9,0	4,8	13,0
Та же вода с добавкой в неё 20 мкг/дм^3 всех исследуемых микроэлементов	0,14	360	4,8	6,0	4,5	6,7	5,7	16,0
	0,35	720	8,8	11,0	7,9	12,0	10,0	22,0
	0,65	1440	13	15,0	12,0	17,0	14,7	27,0
	1,26	2880	15	19,0	14,0	20,0	18,0	30,0
Та же вода с добавкой в неё 60 мкг/дм^3 всех исследуемых микроэлементов	0,14	360	15,6	17,6	16,0	18,0	17,0	35,0
	0,35	720	27,6	29,0	26,0	30,0	26,0	52,0
	0,65	1440	32	37,0	32,0	36,0	31,0	58,0
	1,26	2880	38	44,0	36,0	43,0	40,0	68,0

При полном извлечении из МВ магния в виде гидроксида достигается практически полный переход в осадок Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, Mn и др. микроэлементов, содержащихся в МВ. Для очистки сточных вод от металлов это обстоятельство является решающим. Но для аналитических целей полное осаждение гидроксида является неприемлемым, т.к. требует достаточно длительного времени на проведение электролиза и фильтрацию (> 1 часа).

В результате проведенных экспериментов установлено, что масса образующегося при электролизе гидроксида возрастает пропорционально количеству электричества, пропущенному через ячейку, слабо зависит от плотности тока (1- 4 А) и исходногоP^{H}МВ (7-8,5).Изменение солености МВ в интервале от 36 до 16‰ практически не влияет на характер зависимости массы оксигидрата от количества пропущенного электричества. Из анализа табличных данных следует, что степень извлечения оксигидратом магнияCu, Pb, Cd, Zn, Mn,Fe практически одинакова при одинаковой массе осадка и слабо зависит от концентрации микроэлементов в пробе. Поэтому среднюю степень извлечения микроэлемента из МВ в осадок при постоянной массе гидроксида находили по формуле

$$(C/C_o)_{cp} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} (Cj/Co_j)_{m=const} \quad (3)$$

Анализ экспериментальных данных показал, что адсорбция гидроксидом магния микроэлементов из чистой морской воды хорошо описывается изотермой Ленгмюра[6]

$$\frac{C}{Co-C} = K_m \cdot m = K_q \cdot q, \quad (4)$$

где: C_o –содержание микроэлементов в 1дм^3 чистой МВ; С – содержание микроэлемента в оксигидратеMg, осажденном из 1 дм^3 МВ; K_mи K_q - постоянные; q-количество пропущенного электричества.

Среди различных факторов, способных вызвать изменение сорбционной способности гидроксида магния, основным является температура. Поэтому были проведены эксперименты по электролизному осаждению $Mg(OH)_2 \cdot 2\ H_2O$ в температурном интервале 10-40 ºС. Этот интервал соответствует практически значимому интервалу температур. Результаты опытов представлены в таблицах 2 и 3. Из них следует, что влияние температуры практически не сказывается на степени извлечения металлов из МВ и после 20-минутного электролиза током 2А составляет независимо от микроэлемента 55-65%. Независимость степени извлечения от температуры указывает на соосаждение как доминирующий процесс в концентрировании микроэлементов гидроксидом магния. Как следует из экспериментальных данных, представленных в таблицах 2 и 3, повышение температуры благотворно сказывается на скорости фильтрования осадка.

Таблица 2. Влияние температуры и солености на сорбционные свойства гидроксида Mg

t, ºС	S, ‰	Время фильтр., мин.	Содержание микроэлементов в осадке, (C/C_0)x100%						Масса осадка, г
			Zn	Cd	Pb	Cu	Mn	Co	
12	32	135	68	68	62	55	70	58	0,22
28		40	63	65	68	54	61	55	0,36
40		33	66	58	54	51	66	54	0,27
12	16	20-40	63	65	68	54	61	55	0,25
28		10	65	58	68	58	61	54	0,26
40		10	66	65	51	54	64	55	0,25
Среднее извлечение, %			65	63	61	54	63	55	

Наиболее резкое ускорение фильтрования наблюдается в интервале от 12 до 30 ºС. Дальнейшее повышение температуры менее эффективно. Учитывая необходимость уменьшения времени на обработку пробы следует поддерживать температуру в интервале 30-35 ºС.

Таблица 3. Зависимость времени фильтрации и массы $Mg(OH)_2 \cdot 2 H_2O$ от температуры

Номер пробы	t, ºC	Время фильтр., мин	Масса $Mg(OH)_2$,г
10	12-17	240	0,355
15	15-23	50	0,5
11	28-32	15	0,55
19	32-34	13	0,62
14	37-38	10	0,68
20	40-41	12	0,5

В таблице 4 приведены результаты определения Zn, Cd, Pb и Cu в МВ после их предварительного концентрирования гидроксидом магния методом ААС и их прямого определения в МВ без концентрирования методом инверсионной вольтамперометрии (ИВ) на ртутно-графитовом электроде. Для определения тяжелых металлов в МВ методом ИВ использовали предложенные ранее методики [7,8]. При определении микроэлементов в МВ методом ААС необходимо учитывать мешающее влияние щелочных и щелочноземельных металлов. В методе ИВ это влияние не сказывается, так как МВ является естественным фоновым раствором. Сравнение результатов анализанекоторых микроэлементов указанными методами позволило рассчитать степень их извлечения гидроксидом магния из МВ. Полученные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4. Сравнение результатов анализа проб МВ методом ААС и ИВ

Элемент	Содержание в конц. пробе, мкг/см^3 (ААС)	В пересчете на содержание в МВ, мкг/см^3(ААС)	Анализ МВ, мкг/см^3 (ИВ)	Степень извлечения, %
Zn	1,4	$7{,}0 \cdot 10^{-3}$	$12{,}70 \cdot 10^{-3}$	55
Cd	0,14	$0{,}7 \cdot 10^{-3}$	$1{,}38 \cdot 10^{-3}$	50
Pb	1,5	$7{,}5 \cdot 10^{-3}$	$12{,}40 \cdot 10^{-3}$	62
Cu	0,3	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$	$4{,}50 \cdot 10^{-3}$	33

Как следует из таблицы 4 степень извлечения для большинства микроэлементов около 50%. Исключение составляет медь, для которой степень извлечения - около 30%.

Литература

1. Егоров Ю.В. Статистика сорбции микроэлементов оксигидратами. // Изд-во «Атомиздат», М..1975,С.197.
2. Ермоленко Н.Ф., Каратаева Т.П.//Докл. АН БССР, 9, №10, 668 (1965).
3. Коварский Н.Я. , Голованов В.И., Пряжевская И.С. Сб. «Химические исследования морей и океанов» //Изд-во «Наука», М., 1977,С.162.
4. Пряжевская И.С. , Коварский Н.Я. ,Беленький В.С., Чайковская Э.Л. Сб. «Неорганические ресурсы моря»// Изд-во ДВНЦ АН СССР, Владивосток, 1978, с. 51-54.
5. Немов В.А. Методы определения микрокомпонентов в морской воде. Сб. международных научных чтений «Приморские зори- 2001г. Экология, безопасность жизнедеятельности, охрана труда и устойчивое развитие». Вып.1,Владивосток, 2001, С.110 – 111.
6. Немов В.А., Тюрина Е.Ф. Практикум по общей химии. Коллоидная химия.- Учебное пособие.//Изд-во ДВГМУ, Хабаровск,2006г., с.22-31.
7. Немов В.А. Методика определения Zn, Cd, Pb и Cu в МВ методом ИВ // Изд-во ХПИ, Хабаровск, 1978г.
8. Згадова В.А., Немова В.В., Немов В.А. Изучение возможности определения железа и марганца в природных водах методоминверсионной вольтамперометрии //Ж. аналитич. химии, т. XLП (1987), в.9, с.1644 – 1647.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БАНКОМ ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОДВОДНЫХ АКВАТОРИЙ

А.А. Чусов, Л.Г. Стаценко, Б.А. Сальников, Е.Н. Сальникова

Дальневосточный федеральный университет
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, тел /факс: 8 (914) 7315896,
e-mail: Lpsztemp@gmail.com

При проведении натурных экспериментов по дальнему распространению звука в отдельных районах Мирового океана, когда закон вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) определяется в ходе проведения натурного эксперимента, уровень стохастичности акватории определяется экспериментально-теоретическими методами путём сравнения расчётной базы данных вертикальных распределений акустического поля (ВРАП) с данными полученными в натурном эксперименте. Для автоматизированного определения ВРАП необходимо включение системы управления базой данных, предоставляющей быстрый доступ к отдельным элементам данных, необходимых в процессе расчета. При этом сама база данных может включать данные о распределении поля скорости звука и акустического поля как в отдельно взятой локальной акватории, так и в наборе территориально распределенных частей Мирового океана. В первом случае системы хранения данных могут быть установлены на судах, проводящих описанные эксперименты в экспедиционных условиях. Во втором – системы хранения данных могут быть централизованными и предоставлять системам автоматизированного анализа удаленный доступ к данным. Последний случай имеет ряд преимуществ перед первым, основным из которых является возможность централизованного обновления данных по мере изменения условий распространения звука в акваториях. Настоящий доклад посвящен реализации системы управления банком расчетных данных, предоставляющей высокопроизводительный параллельный доступ к данным множеству клиентов, представляющих собой подсистемы автоматизированного анализа. Эти подсистемы в совокупности образуют параллельно-распределенную вычислительную надсистему, выполняющую анализ результатов натурных экспериментов по дальнему распространению звука в одном или множестве районов Мирового океана . Основными источниками временных издержек при доступе к разделяемым данным являются : коммутационная сложность, включающая время пересылки данных между удаленными узлами, реализации протоколов коммуникации узлов, а также блокирующая синхронизация доступа к данным. Снижение коммутационной сложности достигается использованием методов компрессии данных, и корректных коммуникационных протоколов с оптимальными параметрами. В настоящем докладе описывается реализация схем параллельного клиентского доступа различных типов к физической модели хранения данных, позволяющая снизить число и длительность блокировок при синхронизации.

Эффективность гидроакустических средств, применяемых при исследовании и освоении ресурсов окраинных морей Дальнего Востока, в большой степени определяется особенностями формирования акустических полей в реальных условиях океанических волноводов, что делает необходимым учет гидроакустических условий при планировании работ и в ходе их выполнения [1]. Альтернативой аналитическим и численным методам решения стохастического волнового уравнения является численное решение уравнения лучевых траекторий в переменном поле скорости звука, полученное непосредственно из принципа Ферма. Лучевой подход позволяет с единых позиций оценить искажения структуры акустических полей при любых режимах стохастичности гидрофизических параметров водной среды (слабых, сильных и насыщенных флуктуациях поля скорости звука). Кроме того, инструмент геометрической акустики является наиболее приемлемым в прикладных задачах акустики океана в силу простоты получения решения и интерпретации результатов, и является до сих пор единственным методом, применимым в случае неразделяющихся переменных, имеющим строгое обоснование как асимптотический метод [2]. Уравнение лучевых траекторий в переменном поле скорости звука, полученное из принципа Ферма, имеет вид

$$C(x,z)\cdot\frac{d^2z}{dx^2}-\left(1+\left(\frac{dz}{dx}\right)^2\right)\left(\frac{dz}{dx}\cdot\frac{\partial C(x,z)}{\partial x}-\frac{\partial C(x,z)}{\partial z}\right)=0 \qquad (1)$$

где общая модель поля скорости звука $C(x, z) = C_{оп}(x,z)+\Delta C^{\approx}(x,z)+\Delta C^{=}(x,z)$, $C(x, z)$ – «истинное» ВРСЗ; $C_{оп}(x, z)$ – опорное (усредненное) ВРСЗ, измеренное в результате гидрологической съемки акватории или полученное на основании исторического массива гидрологических данных – детерминированная компонента; $\Delta C^{\approx}(x, z)$ – случайная компонента для моделирования стохастичности поля скорости звука, причём $<\Delta C^{\approx}(x,z)>=0$, $\Delta C^{=}(x, z)$ – детерминированная поправка для моделирования локальных нарушений опорного ВРСЗ, вызванных термоклинными линзами, донными газотермальными источниками или техногенными факторами. Анизотропная стохастичность моделируется путём учёта случайной компоненты поля скорости звука. Модельный полигон в вертикальной плоскости разбивается на прямоугольные ячейки, в центр которых генератором случайных чисел распределяются максимальные значения $\Delta C^{\approx}(x, z)$, не превышающие наперёд заданные. Присвоенное значение $\Delta C^{\approx}(x, z)$ снижается до нуля к границе ячейки.

Результаты численного эксперимента обрабатываются методом усреднения «по пространству». Метод усреднения «по пространству» заключается в усреднении результатов моделирования по дискретным интервалам глубин прихода лучевых траекторий.

Дискретное по дальности x ВРАП $A(n, x)$ адекватно описывает его зональную структуру:

$$A(n,x)=\frac{L(n,x)}{L\cdot m}, \qquad (2)$$

где $L(n, x)$ - количество лучей, пришедших в n–ый интервал глубины вертикального разреза, расположенного на расстоянии x от источника за m экспериментов; L - число лучей, вышедших из источника за один эксперимент; m – число проведённых экспериментов. Данная нормировка является одной из модификаций метода согласованного поля, при этом

$$\sum_{n=1}^{N}A(n,x)=1, \qquad (3)$$

где $N = H/\Delta z$ количество эквидистантных дискретных отсчётов ВРАП по глубине z, H – глубина моря в месте расположения вертикального разреза, Δz - интервал усреднения акустического поля по глубине, $1 \le n \le N$ – номер дискретного отсчёта по глубине (дискретная координата глубины), $z = \Delta z\cdot n$ – текущая координата глубины. В данном случае дискретную функцию $A(n, x)$ можно трактовать как распределение вероятности глубин прихода лучевых траекторий при фиксированной дальности x. В данном случае процедура вычисления усредненного поля вертикального разреза на фиксированной дальности x в дискретных отсчетах глубины n сводится к простому суммированию лучей, пересекающих n-й интервал глубины Δz, без вычисления их фактора фокусировки.

Основная идея косвенных методов классификации подводных волноводов по уровню случайной компоненты поля скорости звука заключается в том, что по результатам натурного акустического эксперимента по дальнему распространению определяется режим стохастичности гидрофизических параметров водной среды. ВРАП, полученное в натурном эксперименте, или некоторая характеристика, рассчитанная с использованием экспериментальных ВРАП, сравниваются с расчётной базой данных, для определения соответствия экспериментальной функции ВРАП одному из режимов стохастичности (слабые флуктуации, сильные флуктуации и режим насыщения).

Окраинные моря Дальнего Востока расположены в сейсмически активных зонах с большим количеством переменных донных газо-термальных источников. Поэтому, в связи с частыми изменениями подводной обстановки, существующие исторические базы данных ВРСЗ быстро устаревают. Также на отдельных акваториях изменяются режимы

стохастичности поля скорости звука. Поэтому необходимо оперативное районирование акваторий по ВРСЗ, базы данных которых используются для создания расчетной базы данных ВРАП с заданной дискретностью по дальности при различных уровнях стохастичности поля скорости звука. При этом требуется снижение временных затрат на расчет ВРАП и изменение соответствующих баз данных. Для снижения времени расчета целесообразно применение новых программно-аппаратных архитектур, таких как параллельно-распределенные информационные системы.

Выделяются следующие основные компоненты общей структурной диаграммы систем автоматизированного анализа. Вычислительный узел – нераспределяемая подсистема, непосредственно выполняющая анализ результатов экспериментов в отдельном районе Мирового океана. Эта подсистема, например, может быть установлена на судне, на котором в экспедиционных условиях проводятся эксперименты. Информационный фонд системы – база данных о расчетном распределении акустического поля $A(n, x)$ и опорном $C_{оп}(x, z)$ ВРСЗ в вертикальном разрезе (x, n). Эти данные специфичны для каждого из районов Мирового океана и, соответственно, являются отдельной составной единицей хранения $\mathrm{Data}_i(n, x)$. Физическая и логическая модели хранения данных, которые описаны ниже, реализуются системой управления банком данных (СУБД).

Основным фактором, прямо влияющим на структуру СУБД, является необходимость обеспечения одновременного синхронизированного доступа множества клиентов – подсистем распределенной системы анализа к большому объему данных банка. В связи с этим имеет смысл использовать такой способ физической организации данных в хранилище отдельной базы данных, при котором эти данные предваряются хеш-таблицей, значения которой сгруппированы в древовидную структуру . Структура дерева выбирается такой , при которой ее ветви и листья обладают наименьшей временнòй взаимозависимостью. Последнее дает возможность свести к минимуму использование блокирующих механизмов синхронизации. Для синхронизации доступа клиентов к базам данных используется распределяемый механизм WR (Write-Read lock), реализующий модель синхронизации «читающий-пишущий» и подробно описанный в [3, 4].

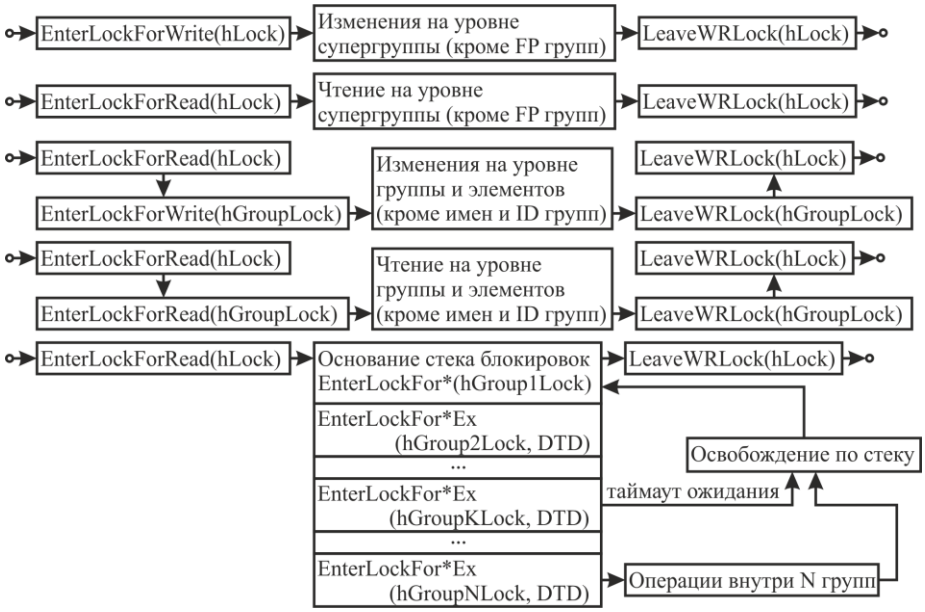


Рис. 1. Синхронизация доступа к банку данных

В структуру СУБД включены две подсистемы. Первая – подсистема управления данными – определяет физическую модель хранения данных и используемое для этого логическое хранилище, обеспечивает синхронизацию доступа к данным и элементам

описанного выше дерева. Кроме того обеспечивается контроль доступа принципалов к этим данным.

Данные распределяются по принадлежности классам, заданным клиентами. Данные каждого класса обслуживаются собственным экземпляром подсистемы управления физической моделью хранения данных и принадлежат собственному логическому хранилищу, например файлу, хранимому на сервере. Управление логическими хранилищами и экземплярами подсистемы управления физической моделью хранения данных обеспечивается второй подсистемой – серверной. Она также обеспечивает внешнюю синхронизацию и защиту доступа к подсистеме управления данными.

Данные в хранилище группируются в древовидную структуру. Дерево состоит из элементов трех типов: супергруппа, группа и элемент. Элементы последних двух типов имеют имена. Хеш-значения, по которым эти элементы идентифицируются, являются значениями детерминированной функции от имени.

Каждый элемент дерева, кроме корня, сопровождается указателем, под которым здесь подразумевается значение, состоящее из хеш-идентификатора *ID* фиксированной длины и адреса элемента данных *FP*. Супергруппа представляет собой упорядоченный по идентификаторам вектор $S_G = \{P_G\}$ из фиксированного числа N_G указателей на группы и их имен N_M. Имена также имеют фиксированное ограничение сверху по длине.

Данные группы представляют собой односторонние связанные списки из векторов фиксированного размера N_E, состоящих из указателей. Первые $N_E - 1$ указателей являются указателями на фактические данные и имеют идентификаторы, образуемые детерминировано от имен элементов с помощью хеш-функции. Структура данных таких элементов, образующих листы дерева, представлена тремя полями: имя элемента, которое должно быть уникальным в пределах всей группы; поле фиксированного размера, содержащего объем данных элемента, в байтах, диапазон значений поля ограничен сверху максимальным размером, заданным для хранилища; буфер данных элемента размером, заданным для хранилища, содержащий заданное предыдущим полем количество байт данных элемента. Последний элемент вектора указывает на следующее звено списка группы. Этот элемент имеет значение идентификатора, равное идентификатору группы и файловый сдвиг на данные следующего звена. Упорядочение указателей элементов ведется по всему групповому списку. Клиент подсистемы для обращения к структурным элементам физической модели хранения данных использует дескриптор, который указывает на следующую информационную структуру: дескриптор хранилища, предоставляемый операционной системой, а также дескриптор и имя экземпляра механизма синхронизации WR. Имя является хеш-функцией от абсолютного имени хранилища. Соответствующие манипуляции с именем также производятся при создании/открытии WR. Реализация [3, 4] WR позволяет распределять дерево хранилища. Описанная структура создана такой, чтобы выделить три основных иерархических уровня дерева хеш-значений, и обеспечить между ними наименьшую взаимозависимость. Кроме того при такой организации структуры операции на одном уровне иерархии наименьшим образом влияют на другие уровни, что позволяет проводить эффективную синхронизацию разделяемого доступа к описанному дереву с минимальным использованием объектов синхронизации доступа к нему. На рис. **1** представлено пять типов операций подсистемы управления данными с точки зрения многопоточной синхронизации. При этом используются два иерархических уровня синхронизации доступа к элементам дерева хеш-значений. Первый уровень управляется посредством именованного экземпляра WR. Этот экземпляр создается при запуске подсистемы управления данными, а его дескриптор, на рис. **1** обозначенный как hLock, заносится в структуру дескриптора подсистемы. Этот экземпляр используется для защиты вектора супергруппы. Второй уровень синхронизации задается набором экземпляров, работающих в расширенном режиме. На рис. **1** этот набор задается дескрипторами hGroupLock, hGroup1Lock, …, hGroupXLock. Задача этих экземпляров состоит в обеспечении синхронизации обращений к группам и элементам этих групп. Эти экземпляры также

являются именованными. Имя является функцией от базового имени синхронизации (имя экземпляра hLock) и идентификатора группы.

Первые два типа операций – изменения и чтения на уровне супергруппы – являются простейшими случаями использования WR, заключающимися в выполнении соответствующих операций при нахождении в базовой синхронизируемой секции (критической секции – КС) на запись и чтение соответственно. Значения *FP* полей супергруппы защищаются следующими двумя типами. Третий и четвертый типы обеспечивают синхронизацию операций уровня групп. При этом в первую очередь, обеспечивается вхождение в базовую КС на чтение, что защищает супергруппу от изменений во время вызовов, не блокируя вызовы, не изменяющие супергруппу. Вложенным является вхождение в КС для защиты структуры групп. К данным типам не относятся операции, результатами которых является изменения имен и идентификаторов групп, поскольку, ввиду необходимости сохранения упорядоченности соответствующих указателей супергруппы, последняя изменяется, что требует применения синхронизации 1-го типа. Последний, пятый, тип синхронизации защищает дерево при операциях, изменяющих структуры/элементы одновременно нескольких групп. При этом использование безвременной блокировки участвующих в операции групп может привести к взаимоблокировке выполняющихся потоков. Поэтому схема синхронизации использует конечное ожидание освобождения экземпляров WR соответствующих групп. Время ожидания DTD (Deadlock Timeout Detection) подбирается эмпирически для конкретных внешних условий: аппаратной и программной среды, в которой работает подсистема, наиболее вероятное количество клиентов, одновременно выполняющих операции, требующие синхронизации данного типа, наиболее вероятный тип операций файловой подсистемы и их частоту. Время должно быть выбрано таким, чтобы в этих условиях обеспечить минимальную среднюю длительность взаимоблокировок. Это время подается на вход алгоритмов, реализующих протоколы входа в КС на чтение и запись (с конечным во времени блокирующим ожиданием освобождения экземпляра WR) – соответственно EnterLockForReadEx и EnterLockForWriteEx. При такой синхронизации экземплярами WR групп имеется стековая структура соответствующих вызовов. При этом в случае возникновения таймаута ожидания освобождения WR одной из групп, предполагается возникновение условий состязательности. В этом случае производится последовательное освобождение WR групп верх по стеку, после чего производится следующая итерация цикла входа в КС WR групп. Максимальное количество итераций цикла может быть как конечным, так и бесконечным. В случае если ситуации таймаута не возникает, после выполнения потоком защищаемых операций он освобождает занятые КС вверх по стеку, после чего завершает выполнение функции.

Литература

1. Сальников Б.А. Моделирование и исследование зональной структуры акустических полей в случайно-неоднородных подводных волноводах / Б.А.Сальников, Е.Н.Сальникова // Подводные исследования и робототехника / Научно-технический журнал ДВО РАН, Институт проблем морских технологий, Владивосток: Дальнаука, 2008. №1 (5). С. 47-57.

2. Мальцев Н.Е. Математические модели звуковых полей в океане (задачи и методы) // В кн.: Акустика океанской среды, М.: Наука, 1989. С. 4-10

3. Чусов А.А. Параллельный поиск сигналов с заданными взаимно и автокорреляционными свойствами на многопроцессорных платформах / А.А. Чусов, А.А. Ковылин, Л.Г. Стаценко, Ю.В. Миргородская // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника, г. Киев, Украина, 2011г., Т. 54, № 8, С. 29-35

4. Чусов А.А. Гибкая архитектура для параллельного анализа и визуализации физических полей: дис. …канд. физ.-мат.наук : 05.13.11: защищена 11.10.12 / Чусов Андрей Александрович – Владивосток, 2012. – 211 с.

МОРСКОЕ НАПРАВЛЕНИЕ АГРОМЕТЕОРОЛОГИИ, ИЗУЧАЮЩЕЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ФАКТОРАМИ СРЕДЫ И УРОЖАЙНОСТЬЮ ГИДРОБИОНТОВ

Л.А. Гайко

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева,
690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
т. р.: (4232)312-629, факс: (4232)312-573, gayko@yandex.ru

Рассмотрены вопросы возникновения новой концепции сельскохозяйственной метеорологии – морской, направленной на информационную поддержку марихозяйств. Установлено, что существующие методы прогноза продуктивности урожайности морских ферм имеют эмпирический характер. Пришло время смены парадигм – эмпирический подход должен быть заменен методологией на основе моделирования причинно-следственных связей между гидрометеорологическими условиями и продуктивностью марихозяйств. Делается вывод, что важным направлением прикладной маригидрометеорологии является создание систем различного уровня для информационного обслуживания марихозяйств и рекомендации по выбору хозяйственных решений, связанных с производством приморского гребешка.

В настоящее время перспективным направлением исследования прибрежной зоны моря является поиск путей к увеличению биологических ресурсов, и одним из таких путей является морская аквакультура или марикультура. Морская аквакультура – это целый комплекс биотехнологий по производству и переработке ценных морских животных и растений. Хозяйства марикультуры, в которых производится выращивание гидробионтов экстенсивным методом (в естественной среде), находятся в большой зависимости от влияния факторов внешней среды, особенно климатических. Для изучения влияния абиотических факторов на биологический объект и на технологию по его выращиванию необходим непрерывный длительный ряд наблюдений над объектами, которые можно получить только в хозяйствах марикультуры. Чтобы обеспечить рентабельность ведения хозяйства, необходимо создание научно-обоснованных методов долгосрочного прогноза урожайности моллюсков. Существующие методики прогноза урожайности молоди гидробионтов носят эмпирический характер [1, 2, 4, 5, 7]. Настало время смены парадигм – на место эмпирического подхода необходимо ввести методологию, основанную на моделировании причинно-следственных связей между гидрометеорологическими условиями и продуктивностью марихозяйств. В представляемой работе рассматриваются вопросы становления нового направления агрометеорологии – морского, задачей которого является информационное обслуживания хозяйств марикультуры, а также рассматриваются теоретические подходы агрометеорологии применительно к марихозяйствам.

Первое опытно-промышленное морское хозяйство было создано в зал. Посьета в 1970 г. для товарного выращивания приморского гребешка *Mizuhopecten yessoensis (Jay)* [1]. Приморский гребешок является наиболее перспективным видом (из моллюсков) для искусственного выращивания на Дальнем Востоке, так как обладает высокими темпами роста и прекрасными вкусовыми качествами. За основу культивирования приморского гребешка был принят японский опыт разведения моллюсков путем сбора личинок и последующего их подращивания на искусственных субстратах – коллекторах [4] (рис. 1). Выращивание производится в естественной среде, т.е. это экстенсивный метод выращивания.

Существующие методики прогнозирования плотности спата приморского гребешка в основном разработаны на Экспериментальной морской базе «Посьет» и основаны на выявлении эмпирических зависимостей между биологическими и гидрологическими показателями, которые в различных комбинациях использовались при составлении прогнозов. [1, 2, 7].

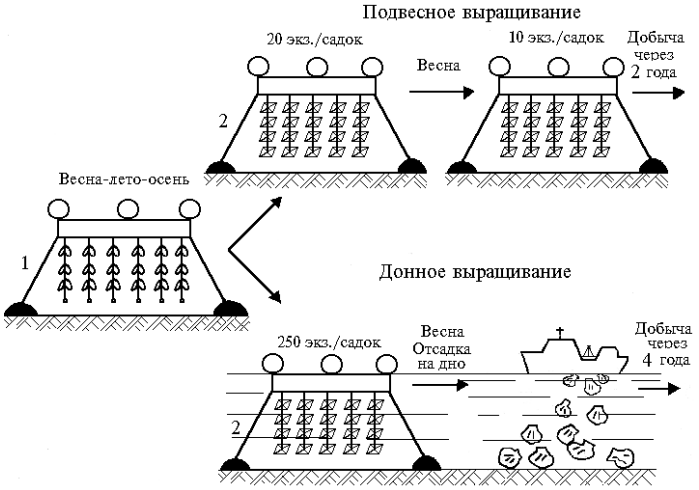


Рис. 1. Технологическая схема выращивания приморского гребешка:
1 – сетные коллекторы для сбора спата гребешка;
2 – сетные садки для выращивания гребешка

По заблаговременности все прогнозы, применяемые в марикультуре для предсказывания урожайности, можно разделить на три группы: долгосрочные, краткосрочные и текущие.

Долгосрочные прогнозы имеют заблаговременность до четырех месяцев и составляются на основе многолетних биологических, гидрометеорологических и фенологических наблюдений. Точность долгосрочных прогнозов зависит от длительности ряда наблюдений и объема собранного многолетнего материала.

Краткосрочные прогнозы охватывают период в несколько суток до начала нереста. Для составления прогноза из природных популяций делается выборка половозрелых моллюсков и производится биологический анализ.

Текущие прогнозы выполняются после начала оседания личинок на коллекторы. В случае появления в планктоне новых генераций личинок можно рекомендовать дополнительный сбор спата или предлагать меры, предохраняющие коллекторы от избыточного оседания.

Такой подход к прогнозированию плотности спата приморского гребешка, основанный на выявлении эмпирических зависимостей, целиком локален в пространстве и времени. При этом основное внимание уделяется поиску прямых эмпирических связей между средой и объектом, и используются общеизвестные методы формального статистического анализа. Но применение прогноза только в этом аспекте значительно ограничивает возможности гидрометеорологического обслуживания хозяйств марикультуры и не позволяет составить прогнозы с большой заблаговременностью. Для решения задачи прогнозирования урожайности моллюсков необходим принципиально новый подход, основанный на использовании для хозяйств марикультуры в прогностических целях климатической информации, который давно используются при составлении прогнозов в агрометеорологии [6, 9]. Новая методология должна базироваться на моделировании причинно-следственных связей между гидрометеорологическими условиями и продуктивностью марихозяйств, т.е. необходимо соединение описательного гидробиологического подхода и агрометеорологического, с присущей ему комплексностью и глубиной анализа явлений и процессов на количественной основе.

Но агрометеорология – это наука, изучающая климатические, метеорологические и гидрологические (понимается гидрология суши) условия, имеющие значения для сельского хозяйства, а в нашем случае мы имеем дело с новым направлением агрометеорологии, изучающим также и влияние факторов морской среды на объекты марикультуры. Условно назовем это направление *маригидрометеорологией*, где *мари-* – от слова *марикультура,* а

гидрометеорология – т.к. учитываются и метеорологические, и гидрологические факторы среды. Отсюда вытекает определение, что *маригидрометеорология* – это наука, которая изучает реально существующие связи между погодой, атмосферной циркуляцией и параметрами морской среды в предшествующий период с одной стороны и урожайностью культивируемых культур, формирующейся под влиянием этих условий, с другой стороны.

Маригидрометеорология так же, как агрометеорология, базируется на методах математической статистики и теории вероятности. Статистические методы основаны на оценке как синхронных, так и асинхронных корреляционных зависимостей между значениями различных гидрометеорологических элементов и объектом. Эти методы позволяют составлять прогнозы урожайности биологических объектов различной заблаговременности. Синоптико-статистические методы прогноза урожайности сельскохозяйственных культур разрабатывались на основе методов долгосрочных прогнозов погоды [8], учитывающих множество факторов, являющихся источниками долговременных аномалий погоды, поэтому целесообразно строить многопараметрические схемы. В долгосрочном прогнозировании урожаев в сельском хозяйстве, помимо погодных условий, учитываются и факторы, связанные с биологическими особенностями культуры и технологией ее выращивания. Эти методы позволяют составлять прогнозы урожайности различной заблаговременности, в том числе и до сева.

В задачи *маригидрометеорологии* применительно к хозяйствам марикультуры входит создание конкретной прогностической физико-статистической модели и расчетного способа прогноза урожайности объекта культивирования. Следовательно, в морском фермерстве для разработки долгосрочного прогноза урожайности марихозяйств с успехом должны быть применены физико-статистические методы, используемые для прогноза урожайности сельскохозяйственных культур.

На первом этапе создания модели необходимо провести выбор наиболее информативных предикторов, влияющих на биологический объект и на технологию его выращивания. На втором этапе необходимо провести исследование временного ряда урожайности марихозяйства. В марикультуре, как и в сельскохозяйственном производстве, временной ряд урожайности является нестационарным, т.к. колебания урожайности обусловлены уровнем агротехники, долгопериодными колебаниями климата и т.п. Для выделения из временных рядов урожайности этих существенных факторов агрометеорологи предложили использовать понятие «тенденция» или «трендовая составляющая урожайности» [9, 10]. Подобный подход применительно к марикультуре на примере прогноза урожайности гребешка был применен автором впервые. По аналогии с агрометеорологией, урожайность моллюсков, рассматривается как сумма двух основных составляющих: неслучайной или трендовой, обусловленной культурой агротехники и долгопериодными колебаниями климата, и случайной составляющей, которая определяется погодными особенностями конкретного года (t), то есть:

$$P_t = E_t + \Delta P_t.$$

где P_t – урожайность моллюсков, E_t – неслучайная или трендовая составляющая урожайности, ΔP_t – случайная составляющая урожайности.

Для выделения неслучайной или трендовой составляющей урожайности производится сглаживание ряда урожайности моллюсков и его выравнивание при помощи аналитических функций. Для дальнейших расчетов на основании анализа распределения отклонений от тренда весь исходный ряд урожайности условно разделяется на три группы лет: высокоурожайные (выше тренда), низкоурожайные (ниже тренда) и среднеурожайные (около тренда).

Для расчета случайной составляющей при построении прогностической схемы за основу была взята трехуровенная модель, которая хорошо себя зарекомендовала при

прогнозе урожая риса [10]. При разработки модели были учтены параметры, характеризующие особенности морской среды.

Разработанная автором модель прогноза случайной составляющей урожая моллюсков учитывает одновременно состояние морской среды, приземных слоев атмосферы, тропосферную циркуляцию, циркуляцию в стратосфере и гелиофизические факторы [3]:

$$\Delta P = a_1 (A_1, A_2) + a_2 B + a_3 (C_1, C_2, C_3) + a_4,$$

где ΔP – случайная составляющая урожайности, a_1, a_2, a_3 и a_4 – коэффициенты уравнения; A_1, A_2, B, C_1, C_2, C_3 – предикторы:

A_1, A_2 – предикторы, учитывающие гелиофизические факторы (солнечная активность, солнечные и лунные затмения) и циркуляцию стратосферы (положение и интенсивность циркумполярного вихря);

B – предикторы, учитывающие циркуляцию тропосферы (формы атмосферной циркуляции, типы синоптических процессов).

C_1, C_2, C_3 – предикторы, учитывающие особенности приземного состояния атмосферы над поверхностью того района, по которому прогнозируется урожай, (аномалии температуры воздуха, сумма осадков за весенне–летний период, число дней с различными типами погоды и т.д.); особенности состояния подстилающей поверхности данного района (аномалии поверхностной температуры и солености морской воды, длительность ледового периода и т.д.) и учитывающие биологические особенности объекта культивирования (термогалинные характеристики различных биологических периодов, даты начала этих периодов, их продолжительность и т.д.).

Поскольку алгоритм схемы прогноза был основан на статистических методах с учетом гелиофизических, синоптических и гидрометеорологических факторов, то такая схема прогноза является физико–синоптико–статистической.

Важным направлением развития прикладной *маригидрометеорологии* является создание систем различного уровня для информационного обслуживания марихозяйств, составление гидрометеоролого-технологических блок-схем хозяйственных решений, гидрометеорологических долгосрочных прогнозов, необходимых для их принятия, и рекомендации по выбору хозяйственных решений, связанных с производством приморского гребешка.

Таким образом, *маригидрометеорология* изучает реально существующие связи между погодой, состоянием морской среды, приземных слоев атмосферы, атмосферной циркуляцией и гелиофизическими факторами в предшествующий период и урожайностью культивируемых культур, формирующейся под влиянием этих условий, что позволяет составлять схемы прогноза большой заблаговременности. На основании вышеизложенного можно утверждать, что применение методов агрометеорологии к марикультуре представляется обоснованным и прогрессивным.

Литература

1. Белогрудов Е.А. Биология и культивирование приморского гребешка // Культивирование тихоокеанских беспозвоночных и водорослей. М.: Агропромиздат, 1987. С. 66-71.

2. Брегман Ю.Э., Седова Л.Г., Викторовская Г.И. Методические рекомендации по прогнозированию плотности спата приморского гребешка на коллекторах. Владивосток: ТИНРО, 1987. 15 с.

3. Гайко Л.А. Марикультура: прогноз урожайности с учетом воздействия абиотических факторов. Владивосток : Дальнаука, 2006. 204 с.

4. Ито С. Разведение морского гребешка у охотоморского побережья о. Хоккайдо. Изд. ”Нихон Суйсан Сиггэн Кекай” : Пер. с яп. №54598. Владивосток, 1966. 48 с.

5. Подольский П.Г. Новое в фенологическом прогнозировании (Математический прогноз в экологии). М.: Колос, 1967. 232 с.

6. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 176 с.

7. Раков В.А. Рост и выживаемость личинок тихокеанской устрицы (Crassostrea gigas) в планктоне залива Посьета (Японское море) // Изв. ТИНРО. 1979. Т. 103. С. 79-85.

8. Свинухов Г.В. Синоптико-статистические методы долгосрочных прогнозов погоды на Дальнем Востоке // Труды ДВНИГМИ. 1977. Вып. 65. 168 с.

9. Уланова Е.С., Сиротено О.Д. Методы статистического анализа в агрометеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. с. 198 с.

10. Чирков Ю.И., Пестерева Н.М. Использование ресурсов климата и погоды в рисоводстве. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 160 с.

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ И ВОЗДУХА ВДОЛЬ РОССИЙСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Л.А. Гайко

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева,
690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
т. р.: (4232)312-629, факс: (4232)312-573, gayko@yandex.ru

Рассмотрена изменчивость температуры воды и температуры воздуха вдоль российского побережья Японского моря по данным гидрометеостанций за период 1930-2012 гг. Проведено выявление температурных трендов. Рассмотрено взаимодействие между температурами воды и воздуха.

Особенностью текущего климатического периода является активизация региональных и локальных климатообразующих факторов. При исследовании климатических изменений по отдельным регионам необходимо знание изменчивости гидрометеорологических параметров как от месяца к месяцу, так и от года к году. Важную роль при изучении этого взаимодействия выполняет сеть гидрометеорологических станций, на которых проводятся регулярные наблюдения за температурой воды и воздуха. Обобщение и анализ наблюдений на прибрежных гидрометеорологических станциях, расположенных в этом районе, проводились и ранее [6, 8-12, 14], но они ограничивались или только данными по температуре воды, или только по температуре воздуха, и ограничивались отдельными месяцам. Данная работа является продолжением работ автора, посвященных анализу изменчивости температуры воды и воздуха по данным прибрежных станций, расположенных вдоль российского побережья Японского моря с привлечением данных наблюдений последних лет [2-5, 13].

Измерение гидрометеорологических характеристик на прибрежной акватории Приморского края производят гидрометеорологические станции (ГМС) Посьет, Владивосток, Находка, Рудная Пристань, Сосуново, Золотой (рис. 1).

Рис. 1 Схема размещения ГМС на побережье Приморского края

В работе использовались многолетние ряды данных наблюдений над поверхностной температурой морской воды и температурой воздуха, выполненных на прибрежных ГМС за период инструментальных наблюдений. Рассмотрен период с 1930 до 2012, минимальная длина ряда 75 лет, максимальная – 83 года. Проверка исходных данных на однородность была выполнена в отделах Приморского управления гидрометеорологии и охраны окружающей среды. В качестве количественного критерия значения коэффициента корреляции на 5% уровне значимости был принят $r_{кр} \geq 0{,}24$ (или $R^2 \geq 0{,}058$).

Внутригодовая изменчивость температуры. Годовой ход температура воды и воздуха вдоль побережья Приморья имеют один минимум и один максимум. Экстремальные значения отрицательной температуры воды приходятся на январь–февраль, воздуха – на январь; положительная температуры и воды, и воздуха приходится на август. Отрицательные температуры воды на ГМС Приморья наблюдаются в течение 4-х месяцев (с декабря по март), за исключением ГМС Владивосток (с января по март). Отрицательные температуры воздуха на южных станциях отмечаются в течение четырех месяцев (с декабря по март). Исключение составляет ГМС Находка, где так же, как и на станциях восточного побережья, продолжительность периода отрицательных температур составляет пять месяцев (с ноября по март).

Межгодовая изменчивость температуры. Выявлено, что гидрологический режим прибрежных вод Приморского края весьма сложен и подвержен влиянию как климатических, так и адвективных факторов. С помощью регрессионного анализа значимый положительный тренд в годовом ходе температуры воды за рассматриваемый период был выявлен на южном побережье во Владивостоке и Посьете, а на восточном – только на м. Сосуново (табл. 1). Температура воздуха на всех станциях за рассматриваемый период неуклонно повышается, везде выявлен положительный температурный тренд на 5-ом уровне значимости.

Таблица 1. Коэффициенты полинома первой степени, аппроксимирующего трендовую составляющую годового и сезонного хода температуры воды и температуры воздуха и коэффициент детерминации на ГМС Приморского края

ГМС	Период	Температура воды			Температура воздуха		
		а	б	R^2	а	б	R^2
Посьет	Сезон	0,008	15,18	**0,114**	0,010	13,46	**0,164**
		0,005	-0,285	**0,112**	0,024	-6,028	**0,218**
	Год	0,007	8,735	**0,165**	0,016	5,350	**0,317**
Владивосток	Сезон	0,009	13,81	**0,107**	0,022	13,15	**0,423**
		0,016	-0,03	**0,371**	0,033	-7,238	**0,305**
	Год	0,012	8,052	**0,296**	0,028	4,580	**0,504**
Находка	Сезон	-0,010	13,12	***0,063***	0,019	12,37	**0,439**
		0,013	-0,459	**0,230**	0,037	-7,246	**0,407**
	Год	-0,000	0,068	0,000	0,026	4,222	**0,547**
Рудная Пристань	Сезон	0,003	10,58	0,010	0,012	10,81	**0,223**
		0,003	-0,118	0,009	0,023	-7,619	**0,228**
	Год	0,006	5,918	0,051	0,017	3,112	**0,333**
Сосуново	Сезон	0,014	8,049	**0,110**	0,016	8,870	**0,279**
		0,002	-0,123	0,007	0,016	-9,251	**0,116**
	Год	0,009	4,605	**0,102**	0,016	1,321	**0,293**
Золотой	Сезон	0,007	8,576	0,038	0,011	9,068	**0,186**
		0,003	-0,337	0,023	0,025	-8,401	**0,243**
	Год	0,005	-0,239	0,041	0,016	1,786	**0,280**

Примечание. 1) a. b – коэффициенты полинома первой степени, R^2 – коэффициент детерминации, 2) выделены жирным шрифтом коэффициенты, значимые на 5% уровне, курсивом – характеризующие отрицательный наклон кривой, 3) в числителе – коэффициенты для теплого полугодия (04–10 мес.), в знаменателе – для холодного (11, 12, 01–03 мес.).

Сезонная изменчивость температуры. Сезонное распределение температуры более сложно. В Посьете и во Владивостоке значимый положительный тренд выявлен для обоих полугодий, причем в Посьете вклад теплого и холодного периодов уравновешивается, во Владивостоке тренд более выражен в холодный период. На ГМС Сосуново значимый тренд выявлен только в теплый период (табл. 1). А Находка вообще выделяется из всех станций, здесь в ходе температуры воды зимой выявлен положительный тренд, летом – отрицательный. Такое «несогласование» между температурой воды и температурой воздуха на станции Находка подтверждает и низкий коэффициент корреляции между этими параметрами на станции (r = 0,22), и сам ход среднегодовых кривых температуры воды и воздуха (рис. 2). По всей видимости, такое распределение температур вызвано особенностями местной циркуляции вод, меандрированием Приморского течения, активизацией прибрежных апвеллингов [7, 3]. Температура воздуха имеет значимые положительные тенденции и в холодный, и в теплый сезоны. При этом в Посьете, Находке и на м. Золотом в большей или меньшей степени преобладает зимняя составляющая, а во Владивостоке и на Сосуново, наоборот, летняя.

Сравнение хода среднегодовой температуры воды и воздуха попарно на каждой станции. Для сравнения хода среднегодовой температуры воды и воздуха были построены графики температурного хода (рис. 2).

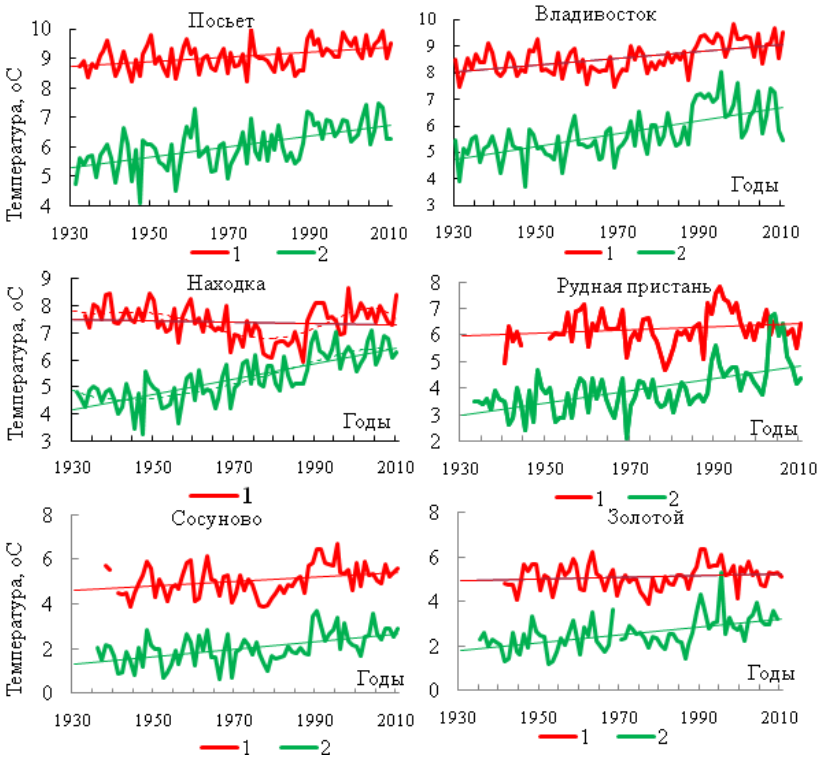


Рис. 2. Межгодовая изменчивость температуры воды (1) и температуры воздуха (2) на ГМС Приморского края и их трендовые составляющие

Очевидно, что графики, построенные для каждой станции, различаются между собой. В Посьете и Владивостоке кривые среднегодовой температуры воды и воздуха идут практически параллельно друг другу с явно выраженной тенденцией повышения. А в Находке картина иная. Если в 30–40-е годы ход температур был аналогичен другим станциям, то после 50-х годов температура воздуха продолжала расти, а температура воды начала резко падать. Такая ситуация продолжалась вплоть до начала 80-х годов, но после 1982–1983 гг. температура воды начала довольно-таки быстро расти на всем побережье. По всей видимости, в этот период в атмосфере произошли какие-то масштабные перестройки, и,

возможно, с изменениями атмосферной циркуляции связанны и значительные изменения в циркуляции вод, так, в этот период также было отмечено сильное Эль-Ниньо [1]. Соответственно, и температурные характеристики поверхностных вод изменились. Следует также отметить, судя по графику, что расхождение между самими кривыми хода температур воды и воздуха в Находке, в отличие от остальных станций, значительно меньше (рис. 2). На станциях, расположенных на восточном побережье, картина хода температур несколько отличается от такового на южных станциях, и в тоже время схожа между собой. В 60–90-е годы на станциях наблюдается довольно четко сформированная линза пониженной температуры, в большей степени выраженная на ГМС Рудная Пристань, и в меньшей – на ГМС Золотой. Причем, в отличие от Находки, отмечено понижение и температуры воды, и температуры воздуха. Такой ход кривых свидетельствует о том, что в эти годы воздушные массы над исследуемыми районами различались по температурным характеристикам.

Анализируя полученные результаты можно отметить, что за период с 1960 по 1990 год стабильный рост температуры воды и воздуха отмечался только в юго-западной части зал. Петра Великого, а в его юго-восточной части, в Находке, стабильно росла только температура воздуха. В ходе температуры воды в Находке в этот период отмечалось значительное ее понижение, с минимумом в 1982–1983 гг. Во Владивостоке и на восточном побережье этот период характеризуется незначительным понижением температуры воды и воздуха (рис. 2). Сглаженные кривые хода температур на графиках в этот период имеют вогнутую форму.

Прирост температуры на станциях за последние 80 лет. По уравнению регрессии был рассчитан прирост температуры на станциях за рассматриваемый период. На всех станциях Приморского края за последние 80 лет отмечен рост температуры как в среднегодовых значениях, так и по сезонам, за исключением Находки. Количественный прирост температуры приведен в табл. 2. Наибольшее увеличение среднегодовой температуры воды в зал. Петра Великого произошло на ГМС Владивостоке (0,9°С/80 лет), на восточном побережье – на м Сосуново (0,7°С/80 лет). Если рассматривать повышение температуры по сезонам, то наибольшее повышение температуры воды произошло в зал. Петра Великого во Владивостоке (на 1,3°С/80 лет) и в Находке (на 1,0°С/80 лет) в холодный период, а на восточном побережье – на м Сосуново (на 1,1°С/80 лет) в теплый. В Находке, в отличие от всех станций, в теплый период температура воды почти на градус понизилась (на -0,8°С/80 лет).

Таблица 2. Прирост среднегодовой температуры воды и воздуха и по сезонам на ГМС Приморского края за 80 лет (1932–2012)

ГМС		ΔtwºC	ΔtaºC	ГМС		ΔtwºC	ΔtaºC
Посьет	Сезон	0,6	0.8	Рудная Пристань	Сезон	0,2	0,9
		0,4	1,9			0,2	1,8
	Год	0,6	1,3		Год	0,5	1,3
Владивосток	Сезон	0,7	1,7	Сосуново	Сезон	**1,1**	1,3
		1,3	**2,6**			0,2	1,3
	Год	**0,9**	**2,2**		Год	**0,7**	1,3
Находка	Сезон	*-0,8*	1,5	Золотой	Сезон	0,6	0,9
		1,0	**2,9**			0,2	2,0
	Год	0,0	**2,1**		Год	0,4	1,3

Примечание. 1) ΔtwºC – приращение температуры воды, 2) ΔtaºC – приращение температуры воздуха, 3) в числителе – коэффициенты для теплого полугодия (04–10 мес.), в знаменателе – для холодного (11, 12, 01–03 мес.).

Среднегодовая температура воздуха в зал. Петра Великого значительнее всего увеличилась во Владивостоке (на 2,2°С/80 лет) и в Находке (на 2,1°С/80 лет), причем

основной вклад в увеличение температуры воздуха на этих станциях внес холодный период (2,6°С/80 и 2,9°С/80 лет соответственно). На восточном побережье среднегодовая температура воздуха на всех станциях выросла за 80 лет на 1,3°С, причем на ГМС Рудная Пристань и Золотой также в увеличение температуры воздуха основной вклад внес холодный период, а на ГМС Сосуново вклады обоих полугодий равны.

Заключение

Проведенные исследования констатируют, что гидрологический режим прибрежных вод Приморского края весьма сложен и подвержен влиянию как климатических, так и адвективных факторов. На прибрежных станциях Приморья в течение периода инструментальных наблюдений положительная тенденция в годовом ходе температуры воды на 5%-ом уровне значимости была выявлена на ГМС Владивосток, Посьет и Сосуново, а в годовом ходе температуры воздуха – абсолютно на всех станциях. Наибольший рост температуры воды произошел: в зал. Петра Великого – в холодный период, во Владивостоке; на восточном побережье – в теплый, на м Сосуново. В Находке, в отличие от всех станций, в теплый период для температуры воды выявлен значимый на 5%-ом уровне отрицательный тренд.

На всех станциях Приморского края за последние 80 лет отмечен рост и температуры воды, и температуры воздуха как в среднегодовых значениях, так и по сезонам, за исключением ГМС Находка. Наибольшее увеличение среднегодовой температуры воды произошло: в зал. Петра Великого на ГМС Владивостоке, на восточном побережье – на ГМС Сосуново. Наибольшее повышение температуры воды во Владивостоке произошло в холодный период, а на м. Сосуново – в теплый. Среднегодовая температура воздуха максимально увеличилась в зал. Петра Великого на ГМС Владивосток и Находка, основной вклад в увеличение температуры воздуха на этих станциях внес холодный период. На ГМС Рудная Пристань и Золотой также в увеличение температуры воздуха основной вклад внес холодный период, а на ГМС Сосуново вклады обоих полугодий равны. Полученные в работе результаты свидетельствуют об изменении температурного режима в исследуемом районе за последние 80 лет.

Литература

1. Волков Ю.Н., Калашников Б.М. Эль-Ниньо: идентификация и возможность прогнозирования // Труды ДВНИГМИ. 1990. Вып. 136. С. 158-172.

2. Гайко Л.А. Марикультура: прогноз урожайности с учетом воздействия абиотических факторов. Владивосток : Дальнаука, 2006. 204 с.

3. Гайко Л.А. Особенности гидрометеорологического режима прибрежной зоны залива Петра Великого (Японское море). Владивосток : Дальнаука, 2005. 151 с

4. Гайко Л.А. Особенности температурного режима заливов Восток и Находка (юго-восточная часть залива Петра Великого) // В кн.: Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря / Отв. ред. А.С. Астахов, В.Б. Лобанов. М. : ГЕОС, 2008. С. 97-110.

5. Гайко Л.А. Тенденция изменчивости температуры воды и воздуха в прибрежных районах северо-западной части Японского моря // Дальневосточные моря России. Кн. 1: Океанологические исследования. М. : Наука, 2007. С. 307-332.

6. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VIII. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. С.-Петербург : Гидрометиздат, 2003. 399 с.

7. Жабин И.А., Грамм-Осипова О.Л., Юрасов Г.И. Ветровой апвеллинг у северо-западного побережья Японского моря // Метеорология и гидрология, 1993. № 10. С. 82-86.

8. Ластовецкий Е.И., Якунин Л.П. Гидрологическая характеристика Дальневосточного государственного морского заповедника // Цветковые растения островов Дальневосточного морского заповедника. Владивосток, 1981. С. 18-33.

9. Покудов В.В., Власов Н.А. Температурный режим прибрежных вод Приморья и острова Сахалин по данным ГМС // Тр. ДВНИГМИ. 1980. Вып. 86. С. 109-118.

10. Пономарев В.И., Салюк А.Н., Устинова Е.И., Каплуненко Д.Д. Современные климатические изменения в Японском море и прилегающих районах // Известия ТИНРО. 2000. Т. 127 (2). С. 20-36.

11. Савельев А.В. Флуктуации термодинамического состояния поверхностных вод Японского моря как отражение макромасштабных климатических изменений в атмосфере Земли // Труды ДВНИГМИ. Темат. вып. № 3, 2000. С. 46-61.

12. Danchenkov M.A., Kim K. Extremal winters in the NW part of the East/Japan Sea by monthly air temperature. In: Proc. of Fourth CREAMS Workshop, R/V Okean, Vladivostok, February 12-13, 1996. Vladivostok : FERHRI. P. 7-16.

13. Gayko L.A. Water and air temperature variability along the coast of Primorye (Japan/East Sea). Current Development in Oceanography. 2012. Vol. 5, N 2. P. 49-58.

14. Varlamov S.M., Kim Y.S., Dashko N.A., Ushakova R.N. Analysis of climate change tendency in the East (Japan) See area // Proc. of Fourth CREAMS Workshop, R/V Okean, Vladivostok, 12-13 February 1996. Vladivostok : FERHRI, 1996. P. 17-21.

МОНИТОРИНГ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ВЛАДИВОСТОКА

В.И. Дулепов, О.А. Кочеткова

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а,
e- mail: dulepov@marine.febras.ru

Металлы одни из приоритетных загрязнителей, как пресноводных так и морских акваторий. Большая часть данных по металлам, особенно, находящихся в растворенном виде, полученные до конца 70 – х годов, представляются в настоящее время завышенными в результате загрязнения проб в процессе отбора и анализа (1). Многие формы тяжелые металлы, в растворенной форме, обладают высокой сорбируемостью на неорганических и органических твердых фазах. В то же время неорганические формы растворенных тяжелых металлов способны взаимодействовать с растворенным органическим веществом, образуя высокотоксичные метилируемые формы. Уникальным свойством многих видов тяжелых металлов, является их способность накапливаться по пищевой цепи, что обуславливает их аккумуляцию в тканях организмов высших трофических уровней – хищных рыб и млекопитающих. В сочетании с высокой токсичностью тяжелых металлов это может вести к значительно негативным эффектам для организмов, обитающих в среде с изначально низкой концентрацией. Металлы – активно используемы человеком или поступают в водные объекты и атмосферу при хозяйственной деятельности. В результате хорошо известны примеры формирования природно – техногенных аномалий различного масштаба. При многих проведенных химико – экологических оценках, акваторий города Владивостока, необходимо особо выделить, что в морские акватории, впадают различные реки и водотоки, с промышленными, сельскохозяйственными и бытовыми стоками. Это обуславливает значительную антропогенную нагрузку на Амурский залив и бухту Золотой Рог, в том числе по таким приоритетным загрязняющим веществам, как тяжелые металлы (1).

Целью данной статьи - установить динамику содержания и концентрации растворенных форм тяжелых металлов при помощи атомно – абсорбционного метода в речных и сточных водах, г. Владивостока.

Материалы и методы. Материал с 2005 – 2008 гг. собран и обработан Кочетковой О.А. в Центре лабораторного анализа и технических измерений по Приморскому краю, материал с 2001 -2004 гг.предоставлены руководством отдела анализа водных ресурсов, загрязнения почв и токсичности отходов Центра лабораторного анализа и технических измерений по Приморскому краю. В реках и ручьях пробы обычно отбирают на глубине 20 – 50 см от поверхности и на таком расстояние от дна, которое допускает аппаратура для отбора пробы. Пробы могут быть смешанными по глубине или по поперечному сечению на стержне потока (2). Места отбора гидрохимических проб взяты на основе данных проектной документации промышленных предприятий и результатов морских наблюдений .

Для обработки материала были применены методы ПНДФ согласно существующим ГОСТ. В качестве объектов с максимально выраженным антропогенным прессом были исследованы основные водотоки г. Владивостока.

Исследование концентраций металлов в речных водах г. Владивостока и Амурском Заливе соответствуют промышленным источникам сброса (2).

Исследования показали, что воды в районе Первой Речки максимально загрязнены медью и цинком, так как во Второй Речке значительно высоки концентрации алюминия и ряда других тяжелых металлов. В р. Объяснения была обнаружена ртуть, что свидетельствует о значительном антропогенном воздействии.

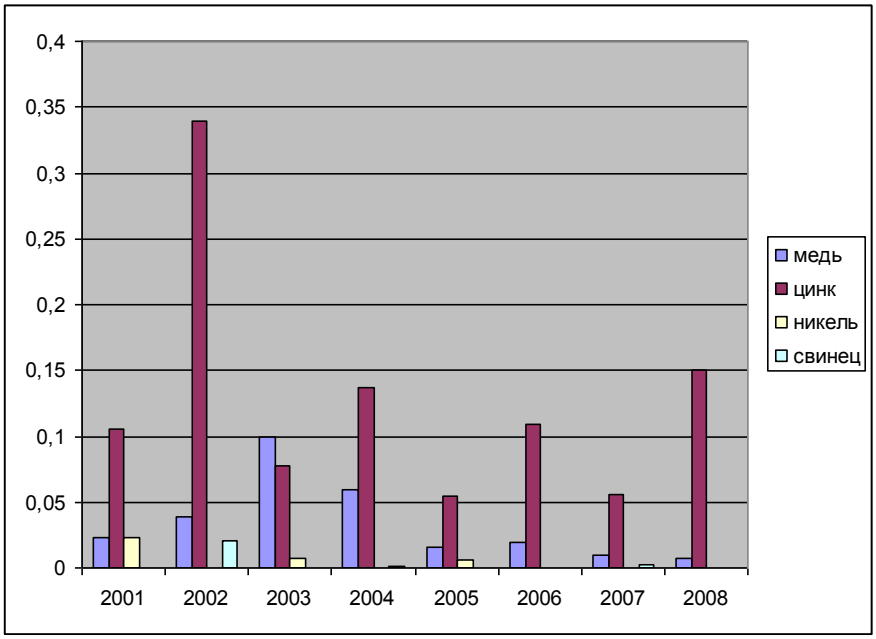


Рис.1. Динамика концентрации основных тяжелых металлов (мг/дм³)
в р. Первая Речка.

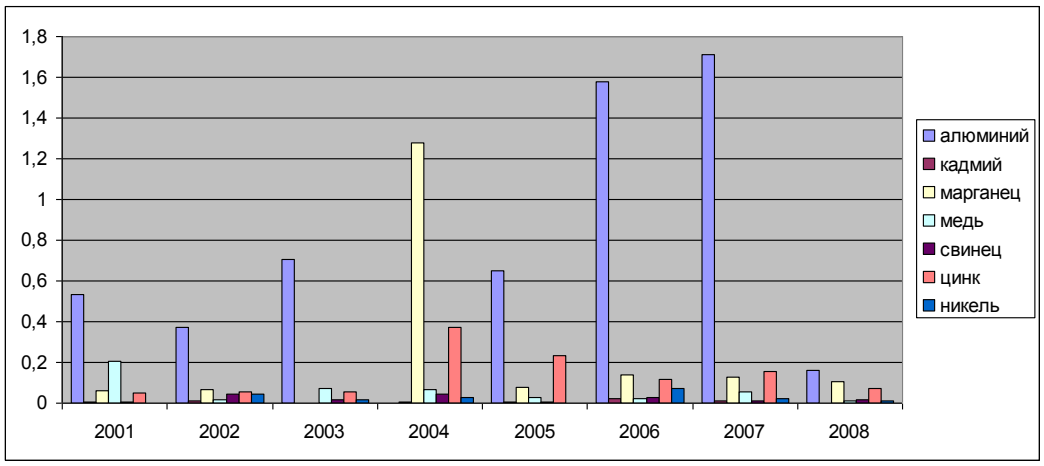


Рис.2. Динамика концентрации основных тяжелых металлов (мг/дм³)
в р. Вторая речка.

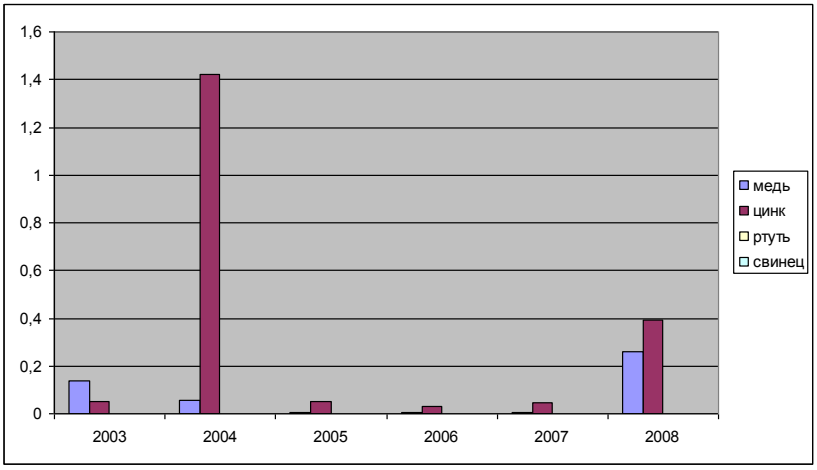


Рис. 3. Динамика концентрации основных тяжелых металлов (мг/дм³)
в р. Объяснения.

Выводы

Таким образом, присутствие определенных видов тяжелых металлов, для каждого из исследуемых объектов связано с характерным промышленным стоком. Промышленные сточные воды имеют очень разнообразный химический состав, который зависит от характера производства и района исследований.

Литература

1. Христофорова Н.К., Шулькин В.М., Кавун В.Я., Чернова Е.Н. Тяжелые металлы в промысловых и культивируемых моллюсках Залива Петра Великого. Владивосток: Дальнаука, 1993. 296 с.
2. Огородникова А.А. Эколого – экономическая оценка влияния береговых источников загрязнения на промысловые биоресурсы и природную среду Залива Петра Великого: Автореф. дисс. к.б.н., Владивосток: ДВГУ, 2002, 22 с.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДАМПИНГА НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЛИВА НАХОДКА (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

В.В. Жариков

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690039, г. Владивосток, ул. Радио, 7.
e-mail: zhar@tig.dvo.ru

Дампинг грунта с полным основанием можно отнести к одному из наиболее мощных процессов, влияющих на загрязнение, характер осадконакопления и ландшафтную структуру прибрежной зоны моря. Влияние дампинга на геоэкологическое состояние залива Находка выражается не только в загрязнении донных отложений техногенными примесями, но и в изменении условий осадконакопления в результате трансформации рельефа и гидродинамической обстановки. Потоки вещества, связанные со сбросом грунта, вызывают качественную перестройку состава донных осадков и формируют источники вторичного загрязнения. Для сохранения контроля над ситуацией необходимо проведение регулярных работ по мониторингу последствий дампинга с учетом специфики природных условий района.

Под дампингом обычно понимается сброс отходов, а также захоронение любых материалов в море. Он сопровождает портовое строительство и работы по обеспечению безопасности судоходства, сопутствует добыче нефти и газа, сооружению трубопроводов на шельфе. Сотни миллионов тонн грунта по всему миру размещаются на морских свалках, а в некоторых районах дампинг является главным фактором антропогенного воздействия на донные ландшафты и экосистемы [1]. Одно из самых опасных последствий дампинга - вовлечение в круговорот загрязняющих веществ, которые, даже после осаждения взвешенного материала являются источником вторичного загрязнения водной среды, донных осадков и пляжевых отложений. Тем не менее, специальные исследования и комплексные оценки состояния полигонов дампинга крайне фрагментарны не только на Дальнем Востоке, но и во всей России [2,3,4].

Цель настоящей работы – комплексная оценка влияния полигона дампинга у о. Лисий на экологическую ситуацию в заливе Находка. В ходе полевых работ были проведены отбор проб воды и грунта для гидрохимического анализа, изучение геоморфологии района (эхолотные промеры глубин) и картографирование подводных ландшафтов с использованием легководолазного снаряжения. Гидрологические исследования включали измерение температуры поверхностной воды, скоростей и направления течения на горизонте 10 м с использованием дрейфующих буйков с заглубленными плавучими якорями.

Антропогенные изменения в геоморфологии дна полигона зафиксированы цифровыми моделями рельефа (ЦМР), построенными по данным навигационной карты, изданной в 1971 г. (рис. 1 А), и результатам эхолотного профилирования, проведенного в ходе полевых работ (рис 1 В). По навигационной карте средняя глубина в районе полигона составляла 29 м, что на 8 м глубже, чем в настоящее время. При этом дно, за исключением верхней части подводного берегового склона острова, представляло собой полого наклонную поверхность, на которой нет никаких признаков тех гряд и холмов, что обнаруживаются сейчас. Сравнение ЦМР наглядно демонстрирует произошедшие изменения, доказывая их антропогенный характер. Эти же данные позволяют определить и количество материала дампинга, аккумулированного у берегов острова за исследованный период.

Объем сброшенного материала, вычисленный как объем тела, образованного между верхней (современный рельеф) и нижней поверхностью (рельеф по состоянию, зафиксированному на 1971 г.), составил величину 11, 486 млн. м^3

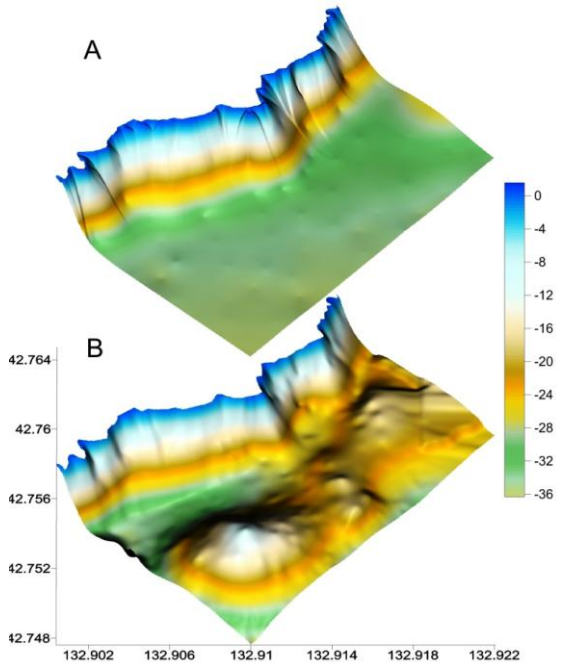


Рис. 1. Цифровые модели рельефа дна полигона по морской навигационной каре 1971 г. (А) и по данным эхолотных промеров 2008 г. (В)

При средней плотности осадков принятой 1,7 т/м^3 и 50% содержании воды, величина годового поступления твердого вещества в районе свалки грунта составляла около 240 тыс. т в год, что очень близко сведениям, почерпнутым из отчетов о дноуглублении. Отметим, что эта величина более чем на порядок превышает среднегодовой сток наносов реки Партизанской, крупнейшего из водотоков, впадающих в залив Находка.

В результате сопоставления распределения температуры в поверхностном слое воды, скоростей и направления течений выявлены явственные пространственные неоднородности, интерпретируемые нами как проявление локальной сезонной гидродинамической ситуации, возникающей у берега острова за счет компенсационного подъема холодных водных масс (+3ºС - +4ºС) при сгоне относительно теплой (от +6ºС до +7ºС) воды поверхностного слоя северными ветрами. Таким образом, апвеллинговая природа течений, омывающих полигон дампинга, по крайней мере, в период наблюдений, становится очевидной.

Результаты исследования структуры ландшафтов позволяют сделать вывод о том, что на части полигона, расположенной выше перегиба подводного склона острова до глубин около 15 м, где физическое влияние дампинга минимально, набор донных фаций и их чередование соответствует типичной последовательности, характерной для фаций открытых скалистых побережий Южного Приморья (рис. 2). Более глубоководные фации полигона прямо повержены действию факторов, связанных с дампингом. Так, при засыпании слоем осадка, превышающим вертикальные размеры организмов, происходит их гибель [5]. И хотя имеются многочисленные сведения о быстрой реколонизации новых субстратов, изменение гранулометрического состава донных отложений и наличие токсичных веществ является очевидным препятствием для восстановления бентосных сообществ [6].

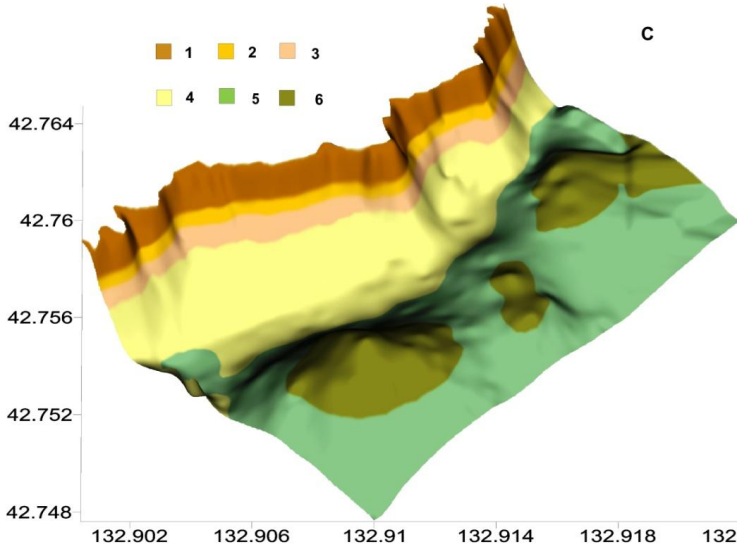


Рис. 2. Ландшафтная карта полигона: 1 - фации субвертикальных скальных поверхностей, 2 – валунно-глыбовый развал, 3 – валунно-галечная отмостка, 4 – слабонаклонная поверхность, сложенная мелкообломочным и рыхлым материалом, 5 – фации дампинга с присутствием фитобентоса, 6 - фации дампинга без фитобентоса

Рассчитанные средние значения индекса загрязнения воды (ИЗВ) дали возможность сравнить по этому параметру зону дампинга с другими акваториями залива Петра Великого. Так, в 2008 г. в заливе Находка качество вод по ИЗВ (1,22) находилось в пределах III класса "умеренно загрязненных" вод, в Уссурийском заливе (1,68) - IV класса «загрязненных» вод, в Амурском залива (1,91) - V класса («грязные воды»), а в бухте Золотой рог (3,26) соответствовало VI классу ("очень грязные воды") [7]. ИЗВ в пределах полигона дампинга (6,5) более чем в пять раз превышал аналогичный показатель залива Находка и относил качество воды в этом районе к VII классу «чрезвычайно грязных» вод. Карта распределения ИЗВ по всей акватории залива Находка приведена на рисунке 2.

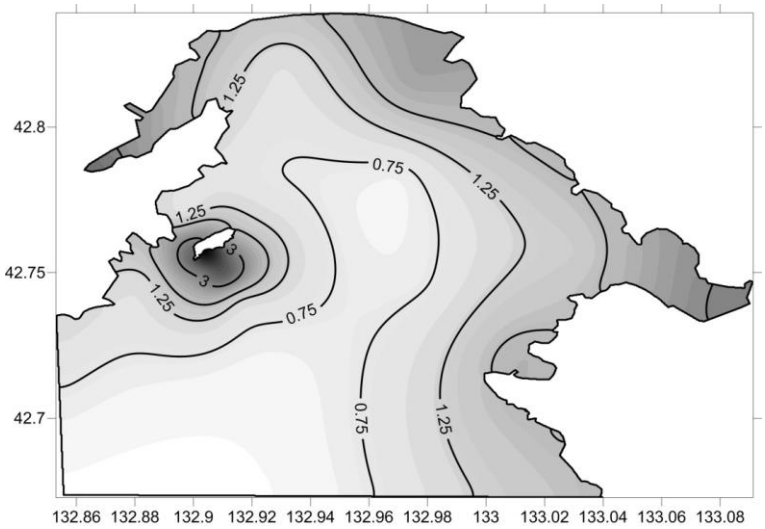


Рис. 3. Распределения ИЗВ по акватории залива Находка

Известно, что активная гидродинамика определяет изменчивость гидрохимических показателей в водной толще, химический же состав донных осадков гораздо консервативней. Он более полно, в сравнении с водой, отражает уровень поступления поллютантов и может рассматриваться как интегрирующий показатель состояния акватории. На рисунке 4 приведено пространственное распределение значений суммарного коэффициента

концентрации металлов ($КК_{\sum}$) на акватории залива Находка. Пространственное распределение концентраций металлов в донных осадках объясняется влиянием гидродинамической обстановки, формирующейся при взаимодействии потоков общей циркуляции, возникающих при проникновении в залив ветви Приморского течения и сезонно-периодических сгонно-нагонных явлений. В период наблюдений сгон поверхностных вод осенними северными ветрами вызывал вдольбереговые течения, связанные с компенсационным подъемом глубинных водных масс.

С тем, чтобы оценить поступление загрязняющих веществ с дампингом, использовались литературные сведения об их содержании в донных осадках бухт Находка и Врангеля [8,9]. Рассчитанный по этим данным вклад дампинга в загрязнение акватории, прилегающей к о. Лисий, составил: Fe – 10400, Zn – 40,5, Cu – 13,5, Pb – 13,4, Cd –1,15, Ni – 9,3 т в год. Эти величины значительно превышают объемы поллютантов, поступающие со сточными водами в залив Петра Великого на всей его акватории.

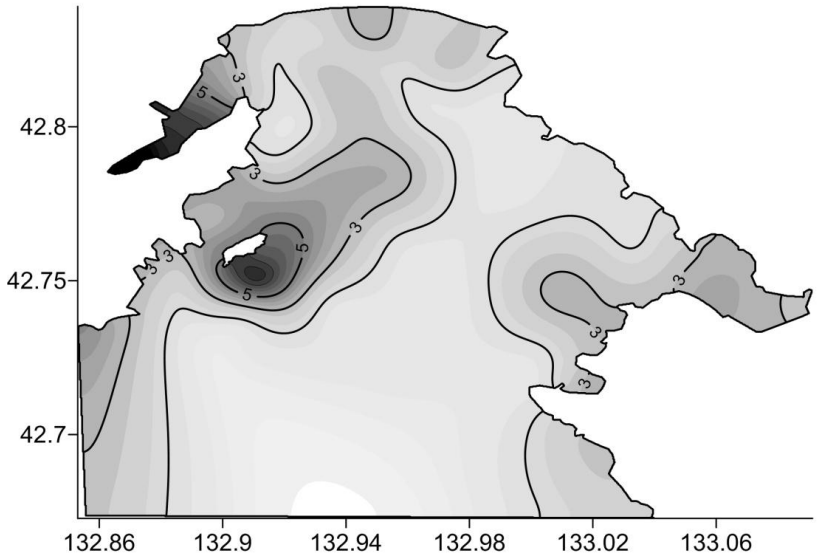


Рис. 4. Распределение суммарного коэффициента концентрации металлов ($КК_{\sum}$) на акватории залива Находка

Полученные результаты позволяют утверждать, что загрязнение донных осадков залива во многом обусловлено постоянным техногенным источником - дампингом загрязненных грунтов, а поля концентраций поллютантов в осадках формируются под влиянием гидродинамики и гидрохимических процессов на границе вода - донные отложения. Кроме того, наши данные подтверждают литературные сведения о том, что сброс в море грунтов, драгированных на портовых акваториях, вызывает изменения в гидрохимическом составе воды и загрязнение осадков, приуроченное к шлейфам разноса материала.

Проведенные исследования показывают, что само расположение свалки грунта у острова Лисьего крайне неудачно, а его выбор, основывался только на экономической целесообразности и стремлении сократить транспортные издержки. Поскольку по этому принципу организованы все немногочисленные официальные свалки грунта у берегов Приморского края, требуется немедленная инвентаризация известных полигонов дампинга, оценка их состояния и поиск альтернативных решений для размещения материала за пределами прибрежного мелководья.

Литература

1. Bolam S.G., Rees H.L. Minimizing impacts of maintenance dredged material disposal in the coastal environment: a habitat approach // Environmental management. - 2003. – Vol. 32, № 2 – p.p. 171-188.

2. Петренко О.А., Себах Л.К., Панкратова Т.М. Антропогенные изменения морской среды под воздействием дампинга грунтов и дноуглубления в Керчинской предпроливной зоне Черного моря./ Тр. ЮгНИРО. Т. 44. - Керчь: ЮгНИРО, 1998. - с. 83-88.

3. Айбулатов Н.А. Деятельность России в прибрежной зоне моря и проблемы экологии / Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова.-М.: Наука, 2005. -364 с.

4. Мишуков В.Ф., Калинчук В.В., Плотников В.В., Войцыцкий А.В. Влияния дампинга загрязненных грунтов на экологическое состояние прибрежных вод г. Владивосток.// Известия ТИНРО. – 2009. – Т. 159. – с 243-256.

5. Maurer D., Keck R. T., Tinsman J. C., Leathem W. A., Wethe C., Lord C., Church T. M. Vertical migration and mortality of marine benthos in dredged material: a synthesis // Int. Rev. GESAMP. Hydrobiol. 1986.Vol. 771, N 1. P. 49 ñ 63.

6. Коновалова Т.В., Белан Т.А., Христофорова Н.К. Количественные изменения бентоса на начальном этапе освоения Пильтун-Астохского нефтегазовоместорождения (северо-восточный шельф Сахалина)/Электронный журнал ΄ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ 1396 http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/116.pdf

7. Коршенко А.Н., Матвейчук И.Г., Плотникова Т.И. и др. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2008. – Обнинск: ОАО «ФОП», 2009. - 192 с.

8. Шулькин В.М. Металлы в экосистемах морских мелководий. – Владивосток:. Дальнаука, 2004. - 276 с.

9. Наумов Ю.А. Антропогенез и экологическое состояние геосистемы прибрежно-шельфовой зоны залива Петра Великого Японского моря. – Владивосток: Дальнаука, 2006. 300 с.

ДИНАМИКА ПРОДУКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНКТОНА В ОХОТСКОМ МОРЕ

Е.П. Дулепова

Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр, 69950, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4, тел/факс: (423)2300-751
e-mail: dep@tinro.ru

Многолетние исследования биоты Охотского моря (Шунтов, 2001; Шунтов и др., 2007; Шунтов, Темных, 2011; Волков, 2008; Дулепова, 2002; Макрофауна…, 2011) свидетельствуют, что рассматриваемый водоем относится к наиболее продуктивным регионам Мирового океана. Для российского промысла ресурсы пелагиали этого моря всегда имели исключительное значение (Шунтов, 2009). Максимальная биомасса нектона в этом водоеме наблюдалась в 1980-е гг., когда основу ее формировал минтай – вид который уже на протяжении длительного периода формирует основу российского вылова на Дальнем Востоке. В последующие годы вплоть до середины первого десятилетия 21 века биомасса минтая, (а с ним и всего эпипелагического нектона) под влиянием комплекса различных факторов находилась на более низком уровне. Однако в конце первого десятилетия 21 века численность минтая значительно возросла в связи с появлением урожайных поколений. Одновременно произошел рост численности сельди, и общая биомасса нектона в эпипелагиали достигла таких же величин, как и в 1980-е гг. (около 20 млн.т).

Немаловажная роль в формировании биомассы нектона, безусловно, принадлежит кормовым ресурсам, и в частности, зоопланктону. Однако также как и в случае с нектоном биомасса планктона за более чем 30-летний период была подвержена существенным перепадам: максимальной она была в 1980-е гг., а минимальной - в 2006-2011 гг., т.е. тогда, когда биомасса нектона была максимальной за последние 20 лет. Но в тоже время величина биомассы зоопланктона не характеризует полностью его кормовой потенциал. Этот подтверждает сам факт роста биомассы нектона при снизившейся кормовой базе. Более показательной в данном случае является величина продукции, которая по своей сути является итогом процессов роста и элиминации за определенный период времени.

В основе настоящей работы лежат результаты комплексных макросъемок ТИНРО-центра в Охотском море в1984 - 2011 гг. Для оценки динамики биомассам зоопланктона (с учетом качественных и количественных характеристик) была использована база данных по зоопланктону (1984-2011 гг.), разработанная А.Ф.Волковым.

Помимо этого, при расчетах использовались следующие собственные и литературные данные: материалы по трофической структуре зоопланктона, данные о продукции или суточных Р/В-коэффициентах компонентов экосистемы и нектона коэффициенты K_2 (коэффициенты использования усвоенной пищи на рост) и коэффициенты усвояемости, данные о спектрах питания, суточные рационы, определенные в естественных условиях энергетические коэффициенты наиболее массовых гидробионтов (Дулепова, 2002, Заика, 1982, Шебанова, Чучукало, 2007).

Подобные методические подходы к определению функциональных характеристик применялись ранее при анализе элементов функционирования экосистем Берингова и Охотского моря (Шунтов, Дулепова, 1995, 1997; Дулепова, 2002). Отличительной чертой настоящей работы является использование при расчетах продукции функциональных групп данных о суточных удельной продукции наиболее массовых видов зоопланктона, полученных для различных сезонов конкретно для Охотского моря.

В качестве рассматриваемых взяты следующие периоды: 1980-1990 гг. и 2006 – 2011 гг. Первый из этих периодов характеризуется наибольшей за все время экосистемных

исследований рыбопродуктивностью и высокими биомассами зоопланктона (Шунтов и др., 2007), а второй период примечателен тем, что при высокой рыбопродуктивности наблюдаются более низкие биомассы зоопланктона по сравнению с1980-ми годами.

По величине продукции низших трофических уровней (и в частности, по продукции зоопланктона) Охотское море в 1980-е гг. всегда было более продуктивным по сравнению с другими дальневосточными морями. Состояние и, следовательно, продуктивность сообществ зоопланктона Охотского моря за весь период экосистемных исследований существенно менялась, при этом значительным этот показатель был в 1980-е гг. (Шунтов и др., 1993; Дулепова, 2002).

Несмотря на сложность таксономического и видового состава зоопланктона в различных ландшафтных участках, межгодовая, межсезонная и межрегиональная изменчивость многолетние исследования и огромный объем полученного материала позволяют получить среднюю картину распределения зоопланктона по различным биотопам и выявить особенности этого распределения в различные периоды.

Что касается изменений в макропланктоне (как наиболее важном в кормовом отношении для нектона), то они произошли в основном за счет копепод и щетинкочелюстных. Причем процессы были разнонаправленными: биомасса первых снизилась в 2 раза, а биомасса вторых увеличилась в 1,4 раза.

Для различных видов нектона большое значение имеют особенности концентрации кормовых организмов в ландшафтных участках, служащих в определенный период их развития выростными и нагульными зонами. В данном случае продукция зоопланктона рассчитывалась для следующих ландшафтных участков моря: внутренней части шельфа, наружной части шельфа со свалом и глубоководной части моря. В указанные периоды исследований наиболее высокие биомассы зоопланктона в целом и его крупной фракции в частности наблюдаются в водах внутреннего шельфа.

Если сравнивать биомассы зоопланктона за весь период исследований с 1984 по 2011 гг., то во всех ландшафтных зонах в 2006-2011 гг. биомасса зоопланктона была значительно ниже, чем в 1984-1990 гг. и в последующие периоды. Исключение составляет район внутреннего шельфа, где наблюдались самые высокие концентрации этого показателя, связанные с возрастанием биомассы щетинкочелюстных.

Наибольшие количественные изменения в 2006-2011 гг. коснулись глубоководной зоны: здесь существенно снизилась биомасса всех фракций зоопланктона за исключением кишечнополостных. В других ландшафтных зонах при снижении биомассы копепод и относительно стабильности биомассы эвфаузиевых наблюдалось возрастание биомассы щетинкочелюстных иногда более, чем в 2 раза.

В целом, основу биомасс зоопланктона в выделенных ландшафтных зонах в Охотском море формируют в различных вариациях практически всего 7 видов, пять из которых по биомассе обычно составляют от 76 до 85 % (Волков, 2008). В прибрежной зоне это: *Thysanoessa rashii, Metridia okhotensis, Sagitta elegans, Pseudocalanus minutus и Calanus glacialis*. В зоне наружной части шельфа наиболее значительными были биомассы *Pseudocalanus minutus, Thysanoessa rashii, Sagitta elegans, Neocalanus plumchrus, Thysanoessa longipes,* а в глубоководной зоне - *Sagitta elegans, Neocalanus plumchrus, Thysanoessa longipes, Themisto pacifica, Metridia okhotensis.*

Наиболее существенно снизили свою численность в 2006-2011 гг. такие ценные в кормовом отношении виды как *Calanus glacialis, Neocalanus plumchrus, Metridia okhotensis.*

На ход динамики общей биомассы зоопланктона влияет большое количество причин: изменчивость пелагической среды, короткоцикличность большинства планктеров несинхронность жизненных циклов и динамики численности разных видов при которой одно и то же время количество одних видов уменьшается, других — увеличивается (Шунтов и др., 2007).

Планктонные сообщества умеренных широт представляют сложные многовидовые системы с множеством связей между слагающими их популяциями гидробионтов, однако

многие экологические параметры большинства планктеров, к сожалению, пока не изучены. С этой точки зрения целесообразно подразделять сообщества на экологические функциональные группировки или элементы со сходными обобщенными характеристиками (Виноградов, Шушкина, 1987). Проведенный анализ особенностей питания различных планктонных организмов свидетельствует, что у основных таксономических групп рацион включает в себя в той или иной степени почти все компоненты планктонного сообщества - от фитопланктона до хищных зоопланктеров, а так же ассоциированного с детритом бактериопланктона и РОВ. По уровню доминирования животной и растительной пищи в рационах планктеров зоопланктон в первом приближении можно представить как систему, состоящую из двух функциональных элементов «хищного» и «нехищного» зоопланктона.

Безусловно, что в зоопланктонных сообществах основную роль в создании органического вещества играют планктеры – фито-, эврифаги, но тем не менее весьма существенно значение планктонных хищников, роль которых многообразна. В планктонных сообществах они с одной стороны они создают органическое вещество, с другой - именно они потребляют фильтраторов, снижая их продукцию.

Выделенные трофические группировки формируются в основном следующими таксонами: нехищный зоопланктон состоит из копепод различных размеров и эвфаузиевых, хищный – из щетинкочелюстных, медуз, амфипод.

Биомассе планктонных хищников как и всему зоопланктону, свойственна весьма сильная межгодовая вариабельность даже в пределах выделенных ландшафтных зона. Например, в водах внутреннего шельфа биомасса планктонных хищников изменяется от 304 до 1052 мг/м^3; в водах внешней части шельфа – от 199 до 410 мг/м^3 , а в глубоководных районах - от 144 до 320 г/м^3. По мере продвижения от внутреннего шельфа к глубоководным районам плотность биомассы хищного зоопланктона падает, при этом основу биомассы хищного зоопланктона всегда составляют щетинкочелюстные: именно они формируют до 80-90% биомассы данной трофической группировки. Щетинкочелюстные в эпипелагиали представлены практически одним видом - Sagitta elegans, биология которого еще недостаточно хорошо изучена. Длительность жизни основной части популяции S. elegans в Охотском море не превышает 1 года, и только крупные особи с длиной тела более 35 мм могут жить до 1,5-2 лет. Динамика биомассы этого вида в Охотском море в общих чертах совпадает с общей динамикой зоопланктона, количеством морского льда и ходом солнечной активности (Волков, 2004)

В среднем для всего Охотского моря за период 1984-2011 гг. моря биомасса хищного зоопланктона изменялась от 268 до 514 мг/м^3, а его доля в общей биомассе зоопланктона на протяжении всего периода экосистемных исследований возросла с 16 до 32 % при указанном выше снижении общей величины.

При довольно сильных вариациях по различным ландшафтным зонам моря биомасса нехищного зоопланктона, в среднем, составляла 1404 мг/м^3 (1980-е гг.) и 792 мг/м^3 (2006-2011 гг.). Основу этой группировки (до 60%) в дальневосточных морях всегда формируют крупные копеподы и эвфаузииды. Как в 1980-е гг., так и в 2006-2011 гг. наибольшая биомасса фито-, эрифагов была в районах внутреннего шельфа. Что же касается хищного зоопланктона, то здесь картина не столь однозначна: в первый период этот показатель был наиболее высок в водах внешней части шельфа, а во второй - в водах внутреннего шельфа, где хищные планктеры составляли довольно значительную часть биомассы зоопланктона.

Оценки кормовой базы рыб на уровне биомасс, недоучитывают рост кормовых гидробионтов и их элиминацию, т.е. их сезонную и годовую продукцию, а кроме того потребление органического вещества внутри сообщества зоопланктона. Всего этого лишены такие показатели как общая и реальная продукция сообщества. Под так называемой «реальной» продукцией понимается та часть продукции зоопланктона, которая доступна рыбам в виде корма и представляет собой сумму продукций трофических группировок зоопланктона за вычетом рациона планктонных хищников.

Основа как общей, так и реальной продукции формируется тонкими фильтраторами и фильтраторами – эвфрифагами Продукция указанных трофических группировок также весьма существенно изменяется по двум периодам. Безусловно, что 1980-е гг. характеризуются очень высоким уровнем годовой продукции планктеров - фито-, эврифагов. А в 2000-х гг. в зоопланктоне возросла продукция планктонных хищников. Как в первый, так и во второй периоды наибольшая продукция нехищного зоопланктона (с учетом глубин в различных ландшафтных зонах) была в наружной части шельфа - очень динамичной по своим гидрологическим показателям зоне (Шунтов, 2001).

Продукция планктонных хищников в 2006-2011 гг. наиболее значительна в прибрежных районах, где хищники продуцируют органического вещества в 2,7 раза больше чем, например, в глубоководной зоне.

Все указанные выше изменения количественных и качественных характеристик зоопланктона отразились, как и следовало ожидать, на формировании реальной продукции зоопланктона. Расчеты «реальной» продукции зоопланктона показали, что в среднем в последние 6 лет ее величина снизилась в несколько раз по сравнению с 1980-ми гг.

В среднем для всего моря общий продукционный потенциал зоопланктона снизился в 2,7 раза. Косвенно все это позволяет заключить, что возможно в настоящее время произошло некоторое ухудшение кормовой обеспеченности нектона. Однако сопоставление объемов продуцирования органического вещества зоопланктоном и его продукции, а также пищевых потребностей рыб показало совершенно иную картину.

Анализ имеющихся материалов показал, что при снижении продукции зоопланктона и изменении его трофической структуры объемы потребления нектоном пищи не уменьшились, следовательно, каких-либо существенных негативных следствий, отразившихся на величине биомассы нектона в 2006-2011, не произошло, хотя относительный уровень выедания доступной рыбам в качестве корма продукции зоопланктона возрос почти в 3 раза с 6,5 до 17%.

Литература

1. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А. Функционирование планктонных сообществ эпипелагиали океана. - М.: Наука, 1987. – 240 с.
2. Волков А.Ф. Численность, биомасса и запас Sagitta elegans в Охотском море в весенний период // Изв. ТИНРО. – 2004. – Т. 136. – С. 205-214.
3. Волков А.Ф. Среднемноголетние характеристики зоопланктона Охотского и Берингова морей и СЗТО (межгодовая и сезонные значения биомассы, доминирование) // Изв. ТИНРО. — 2008. — Т. 152. — С. 253–270.
4. Дулепова Е.П. Сравнительная биопродуктивность макроэкосистем дальневосточных морей. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2002. - 273 с.
5. Заика В.Е. Сравнительная продуктивность гидробионтов. – Киев: Наук. думка, 1983. – 206 с.
6. Макрофауна пелагиали Охотского моря: таблицы встречаемости, численности и биомассы. 1984–2009 /под ред. В.П. Шунтова и Л.Н. Бочарова. — Владивосток: ТИНРО-центр, 2011. — 800 с.
7. Шебанова М.А., Чучукало В.И. Продукция нескольких массовых видов копепод в Охотском море в летнее-осенний период // Изв. ТИНРО. - 2007. - Т. 148. - С. 221-237.
8. Шунтов В.П. Биологические ресурсы дальневосточных морей. Т.1. – Владивосток: Изд-во ТИНРО-центра, 2001. – 580 с.
9. Шунтов В.П. Состояние биоты и биоресурсов морских макроэкосистем дальневосточной экономической зоны России // Вестник ДВО РАН. – 2009. – № 3. – С. 15-22.
10. Шунтов В.П., Волков А.Ф., Темных О.С., Дулепова Е.П. Минтай в экосистемах дальневосточных морей. – Владивосток: ТИНРО, 1993. – 426 с.

11. Шунтов В.П., Дулепова Е.П. Современное состояние, био- и рыбопродуктивность экосистемы Берингова моря // Комплексн. исследов. экосист. Берингова моря. - М: Изд-во ВНИРО, 1995. - С. 358-388.

12. Шунтов В.П., Дулепова Е.П. Современный статус, био- и рыбопродуктивность экосистемы Охотского моря // Комплексн. исследов. экосистемы Охотского моря. - М: Изд-во ВНИРО, 1997. - С. 248-261.

13. Шунтов В.П., Дулепова Е.П., Темных О.С., Волков А.Ф., Найденко С.В., Чучукало В.И., Волвенко И.В.. Состояние биологических ресурсов в связи с динамикой макроэкосистем в экономической зоне дальневосточных морей России // Динамика экосистем и современные проблемы сохранения биоресурсного потенциала морей России. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 75-176.

14. Шунтов В.П., Темных О.С. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Т. 2. Владивосток: ТИНРО-центр. Владивосток , 2011. - 474 с.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ПРИРОДНЫХ РАСТВОРОВ В ОКЕАНЕ

В.В. Княжев

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: kvv@marine.febras.ru

В докладе рассматриваются вопросы возможного преобразования внутренней энергии морской воды, как в глубинах океана с однородными условиями, так и на поверхности океана на границах с атмосферой и берегами.

Морская вода является природным раствором, и от этого в значительной мере зависят ее свойства, и это влияет на процессы переноса энергии в океане, взаимодействии между океаном и атмосферой. В частности, от температуры и солености морской воды зависит ее плотность – важнейшая характеристика морской воды, определяющая в большей степени движение морской воды. Температура и соленость морской воды меняются в основном на границах раздела, на поверхности, при взаимодействии воды и атмосферы, и около побережий. Увеличение плотности поверхностной воды приводит к погружению ее в глубь, так называемому даунвеллингу. Масштабы этого процесса значительны. В Арктическом полярном фронте в даунвеллинге служащем источником Северо-Атлантической глубинной и придонных вод расход воды около 5 млн. $м^3/с$. А около Антарктиды, расход воды в даунвеллинге 25 млн. $м^3/с$ [1]

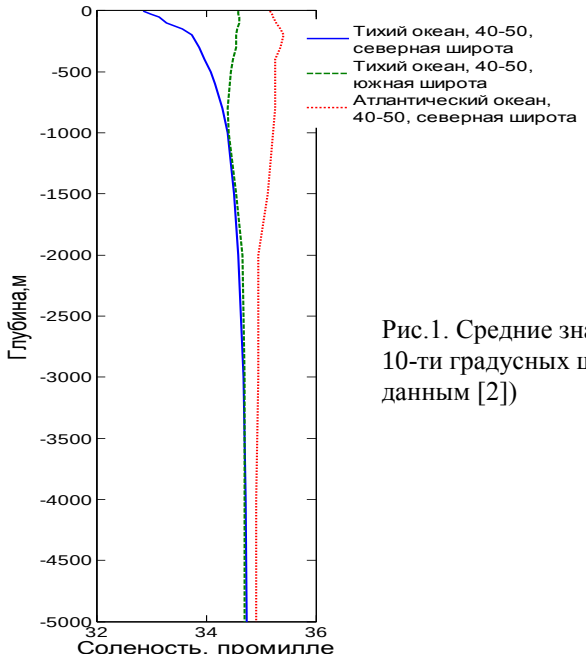


Рис.1. Средние значения солености в 10-ти градусных широтных зонах (построено по данным [2])

Эффективное преобразование внутренней энергии морской воды, возможно, прежде всего, именно в этих зонах, где есть большие перепады ее температуры и солености. Но энергия может быть получена и там, где температура и соленость морской воды постоянны, при этом используется, то, что такое состояние океана не является равновесным. Благодаря течениям вода в океанах перемешивается, в глубоководных районах океана ниже

термоклина температура и соленость воды меняются слабо (рис.1). Если бы океан находился в равновесном состоянии, то его соленость увеличивалась бы с глубиной.

О. Левеншпиль и Н.де Неверс предложили осмотический насос, который можно использовать для получения пресной воды и энергии в океане, рис.2 [3]. Если трубу, закрытую с нижнего конца полунепроницаемой мембраной погружать в глубоководном районе океана, то пресная вода через мембрану начнет поступать только тогда, когда гидростатическое давление морской воды на мембрану станет выше осмотического давления морской воды. Это соответствует примерно глубине 231м. По мере дальнейшего опускания трубы уровень пресной воды в трубе будет расти, так как плотность пресной воды ниже плотности морской воды, и в конце-концов она достигнет поверхности моря.

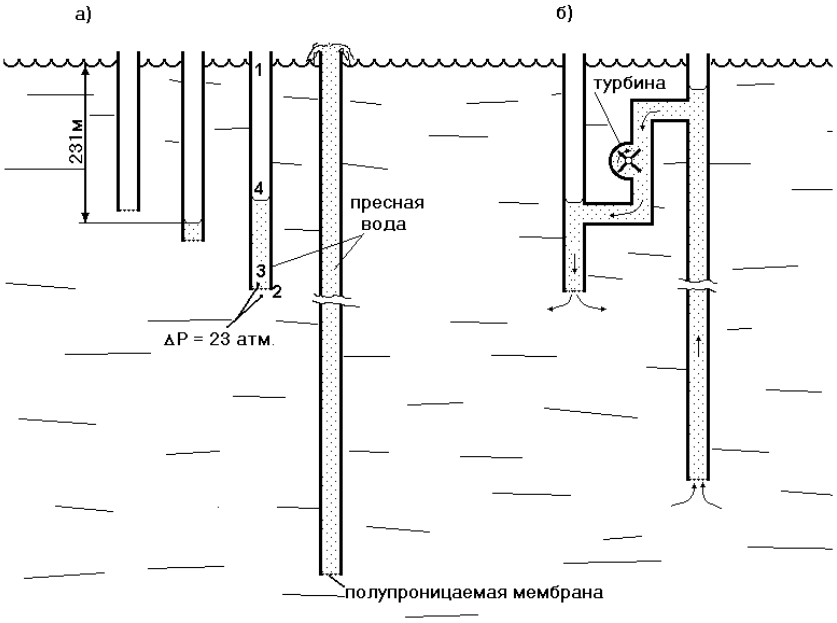


Рис. 2. а) Осмотический насос, б) осмотическая энергетическая установка [3].

Оценим глубину, на которую необходимо опустить трубу. Для описания состояния системы с переменным числом частиц применяется химический потенциал – термодинамическая функция, которая определяет изменение термодинамических потенциалов при изменении числа частиц в системе. Химический потенциал воды в растворе является функцией давления, температуры, состава

$$\mu = \mu(P, T, x_S) \qquad (1)$$

где x_S - мольная доля воды в растворе. Дифференциал его:

$$d\mu = (\frac{\delta\mu}{\delta T})dt + (\frac{\delta\mu}{\delta P})dP + (\frac{\delta\mu}{\delta x_S})dx_S \qquad (2)$$

Так как рассматриваются зоны с постоянной температурой, то первый член в уравнении можно опустить. Из термодинамики:

$$(\frac{\delta\mu}{\delta P})_{T,x_S} = \bar{v}_S, \qquad (3)$$

где $\bar{v}_S$ удельный мольный объем воды в растворе.

Так как движение растворов относительно медленное, то по основному уравнению гидростатики:

$$\frac{dP}{dz} = \rho g \qquad (4)$$

где z – вертикальное расстояние (глубина), ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения.

Так как морскую воду можно считать разбавленным раствором, то по уравнению для идеального раствора:

$$(\frac{\delta\mu}{\delta x_S})_{T,P} = \frac{RT}{x_S} \qquad (5)$$

При подстановке выражений из (3)(4),(5) в уравнение (2), и делении его на dz, получим:

$$\frac{d\mu}{dz} = \overline{v_S}\rho_S g + \frac{RT}{x_S}\frac{dx_S}{dz} \qquad (6)$$

Так как рассматриваем зону с однородными температурой и соленостью, то $dx_s / dz = 0$, и тогда:

$$\frac{d\mu}{dz} = \overline{v_S}\rho_S g \qquad (7)$$

Проинтегрировав выражение (7) для воды внутри и вне тубы, и учтя, что при равновесии химические потенциалы морской и пресной воды на мембране равны, получим:

$$(\frac{\mu_4 - \mu_1}{g\rho_f v_f}) = \frac{\rho_S}{\rho_f} z_{mp} + z_4 - z_{mp}, \qquad (8)$$

где ρ_f - плотность пресной воды, v_f удельный мольный объем пресной воды, который с хорошим приближением равен $\overline{v}_S$, z_{mp} – длина трубы, z_4 – уровень пресной воды в трубе, μ_1 и μ_4 химические потенциалы морской воды на поверхности, и пресной воды в трубе. $(\frac{\mu_4 - \mu_1}{g\rho_f v_f}) = 231$ м, отсюда получается, что z_4=0, при длине трубы в 8750 м., пресная вода достигнет поверхности моря. Энергию от такого осмотического насоса можно получить и при меньшей длине трубы. Если в море на разную глубину погрузить трубы закрытые снизу мембранами, то в них установится разный уровень пресной воды, соединив эти две трубы каналом с гидротурбиной можно получить энергию, рис.2 б. В принципе, можно обойтись и одной трубой с гидротурбиной, концы которой закрыты полупроницаемыми мембранами и находятся на разной глубине.

На поверхности и в прибрежной зоне океана температура и соленость морской воды меняется значительно. Поэтому в уравнении (2) должны учитываться первый и третий члены.

Частным случаем будет использование пресной воды впадающих в море рек, в этом случае рассматривают равновесное смешение пресной и морской воды в изотермических условиях.[4]. Источники энергии такого типа уже используются, в ноябре 2009 г. в Норвегии в Тофте, к югу от Осло, государственная энергетическая компания Statkraft запустила первую в мире осмотическую электростанцию, которая вырабатывает энергию за счет смешивания морской и пресной воды.

В открытом море на поверхности разность соленостей может быть получена при испарении и конденсации воды, при замораживании и размораживании морской воды. Пресная вода из айсбергов и плавучих льдов также может использоваться. Пресная вода, рассолы и исходная морская вода при этом имеют разную температуру, и это разность температур может использоваться для получения энергии. Энергия растворов,

обусловленная разностью соленостью и температур, может использоваться как раздельно, выравнивая температуры в тепловой машине, и преобразование энергии градиентов солености в изотермических условиях. Так и комплексно в не равновесных условиях.
В зонах даунвеллинга с помощью гидротурбин можно отбирать энергию от потока воды. Даунвеллинг может быть организован и искусственно аналогично тому, как это происходит в природе. Имеются три зоны в океане, в которых к интенсивному даунвеллиннгу приводят разные процессы. Так в зоне Антарктического полярного фронта вода промежуточной плотности образуется при смешении теплых Центральных и Субантарктических поверхностных вод с холодными слабосолеными водами из зоны таяния льдов Антарктиды. Смесь двух водных масс с одинаковыми плотностями, но с различными температурами и соленостями имеет большую плотность, чем каждая из этих масс, поэтому она опускается в глубь.

В Северном полушарии есть несколько районов, где образуются водные массы большой плотности. В зонах взаимодействия течений Куросио и Ойясио в тихом океане, и продолжения Гольфстрима с Лабрадорским течением в Северной Атлантике смешение холодных и теплых вод приводит к образованию воды промежуточной плотности. Но более интенсивно в Северном полушарии процесс даунвеллинга идет в двух местах около Гренландии, где из-за быстрого испарения и охлаждения образуется очень плотная вода. Холодный сухой воздух с континента повышает плотность поверхностных вод. Около Антарктиды, в основном в море Уэдделла зимой при замерзании морской воды концентрация ее подо льдом возрастает настолько, что вода начинает погружаться на дно. Таким же образом, смешивая морские воды одинаковой плотности, но с разными температурами и соленостью, повышая концентрацию морской воды при испарении ее или вымораживании можно организовать нисходящие потоки в трубах энергетической установки.

Литература

1. Нешиба С. Океанология. Современные представления о жидкой оболочке Земли. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 414 с.
2. Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М. Морская вода. Справочное руководство. М.: Наука, 1979.
3. Levenspiel O. and de Nevers N.The osmotic pump//Science, 1974.Vol.183, №.4121, P.157-160 .
4. Княжев В.В. Ресурсы и способы преобразования энергии градиентов солености // Вестник ДВО РАН. 2010. №3. С.131 – 138.

КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ В ВОДОПОДГОТОВКЕ И ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МАРИКУЛЬТУРЫ

В.Е. Молотков, В.В. Лощенков

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091г. Владивосток, Суханова 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: mol@marine.febras.ru

В докладе рассматриваются экологически чистые технологии автономного энергообеспечения систем водоподготовки промышленного объекта (цеха) марикультуры с использованием возобновляемых энергоресурсов. Обсуждается возможность использования нетрадиционной энергетики для промышленных объектов марикультуры в климатических условиях побережья залива Петра Великого (Японское море).

Условия климата на побережье северо-западной части Японского моря определяют ряд проблем развития промышленной марикультуры в Приморском крае, важнейшей из которых является энергообеспечение современных технологий культивирования морских организмов в гидротехнических сооружениях, расположенных на островных территориях и побережье. Индустриализация аквахозяйств марикультуры требует достаточно высоких энергозатрат [1]. Большинство марихозяйств расположены в прибрежных районах и островных территориях залива Петра Великого (Японское море) и удаленны от сетей традиционной энергетики. В настоящее время для автономного энергообеспечения производственных объектов (заводов, цехов, модульных культиваторов и установок для воспроизводства и выращивания морских гидробионтов) марикультуры используют топливно-органические энергоресурсы, которые при сжигании оказывают вредное воздействие на окружающую среду. Одним из перспективных путей решения проблемы уменьшения или полного сокращения вредных выбросов является использование систем, генерирующих тепловую или электрическую энергию, работающих с использованием экологически чистых возобновляемых природных источников энергии (ВИЭ), например, ветра и солнца.

По оценкам ряда исследователей ветровые и солнечные ресурсы в Приморском крае можно успешно использовать для получения тепловой и электрической энергий с применением солнечных водонагревательных установок коллекторного типа (СВНУ), фотоэлектрических и ветровых электрогенераторов для систем горячего водоснабжения и отопления различных административных, бытовых и сельскохозяйственных объектов [2,3,4].

В Институте проблем морских технологий ДВО РАН разработана комбинированная схема энергообеспечения модульных систем водоподготовки промышленного объекта (цеха) культивирования гидробионтов марикультуры, которая включает модульные тепловые и электрические генерирующие системы, использующие экологически чистые ветровые и солнечные возобновляемые энергоресурсы (ВИЭ).

Объект (цех) с гидротехническими системами инкубации и выращивания морских гидробионтов (бассейны), представляет собой одноэтажное здание размером 12х24м по наружному периметру (общая площадь 290 м^2), высота стены 6 м без учета крыши. Ограждающие конструкции (стены и крыша) выполнены из сэндвич-панелей толщиной 0,125 м, пол неутепленный, в виде бетонной стяжки на грунте, толщиной 0,1м. В здании цеха расположены: теплообменник для нагрева (охлаждения) воды, связанный трубопроводом с бассейнами различного объёма для культивирования гидробионтов; модульные системы фильтрационной очистки циркуляционного водного технологического потока для каждого бассейна; система отопления воздуха цеха; резервный электрогенератор с реверсивным тепловым насосом; вспомогательные механизмы, системы контроля воды в бассейнах и всех модульных подсистем водоподготовки; блок центрального управления. Общий объем

используемой технологической морской воды в системе 200 $м^3$ (суточная замена воды всей системы 20 $м^3$).

Комбинированная система энергообеспечения автономного объекта (цеха) марикультуры (рис.1) включает: солнечную нагревательную установку (СНУ) с площадью по адсорберу 84$м^2$ (с заданной мощностью 45 кВт), грунтовый аккумулятор длительного хранения тепла и холода, систему аккумулирования тепла (холода) с использованием поверхностных вод прилегающей акватории, солнечную фотоэлектрическую установку (ФЭУ) с аккумулятором (мощностью 3-5 кВт) для выработки электроэнергии требуемой на освещение, работу исполнительных механизмов, приборов контроля и автоматики. В районах расположения морских аквахозяйств с высоким ветровым потенциалом (например, островные территории) для выработки электроэнергии ФЭУ заменяется ветроэнергетической установкой (ВЭУ). В схему теплообеспечения включен резервный реверсивный тепловой насос (мощностью 10 кВт), последний используется при нехватке тепловой энергии для отопления (холодный период года) или охлаждения технологической воды бассейнов (теплый период года) при отклонении среднестатистических температурных сезонных показателей воздуха и, используемой в технологическом цикле, морской воды, поступающей из акватории.

Модульные системы прямого нагрева теплообменника за счет солнечной энергии (гелиосистема с грунтовым аккумулятором), отбора тепла или холода из прилегающей морской акватории, тепловой насос и система отопления воздуха здания цеха заполнены незамерзающим теплоносителем.

Гелиоустановка может работать в прямом режиме нагрева циркуляционной и проточной морской воды в бассейнах (контура С, В) (рис.1). Температура воды в бассейнах регулируется управляющими смесительными термоклапанами после термоводоподготовки в отдельном контуре (контур А) и подачей проточной воды из акватории (контур Е). Забор морской воды из акватории в бассейны и её сброс из гидротехнической системы цеха функционирует непрерывно. Использование в технологической схеме водоподготовки утилизатора тепла (рис.1) позволяет снизить затраты теплоты для нагрева морской воды в системе до 70% в зимний и до 50% в теплый периоды года. Обеспечение необходимых экологических и технологических параметров морской воды, используемой в бассейнах для биотехнологий культивирования гидробионтов, осуществляется с помощью систем фильтрационной очистки (контура К, Е). При заборе морской воды и сбросе используются системы механической фильтрации и обеззараживания (УФ обработка воды).

Для оценки мощности теплового источника по стандартной методике [5] необходимого для теплоснабжения объекта определялись суммарные тепловые потери, которые складываются, из тепловых потерь через ограждающие конструкции здания, затрат тепловой энергии на нагрев вентиляционного воздуха в помещении цеха и на подогрев воды в бассейнах.

Температура воздуха внутри помещения принята равной температуре воды в бассейнах. Воздухообмен в помещении принят 0,5 $м^3/(м^2час)$. В расчетном варианте максимальная мощность общих тепловых потерь объекта при минус 24°С, составила 23,3 кВт·ч/сут. с учетом подогрева морской воды в бассейнах (при средней температуре наиболее холодной семидневки обеспеченность теплом бралась с коэффициентом 0,92 [5]).

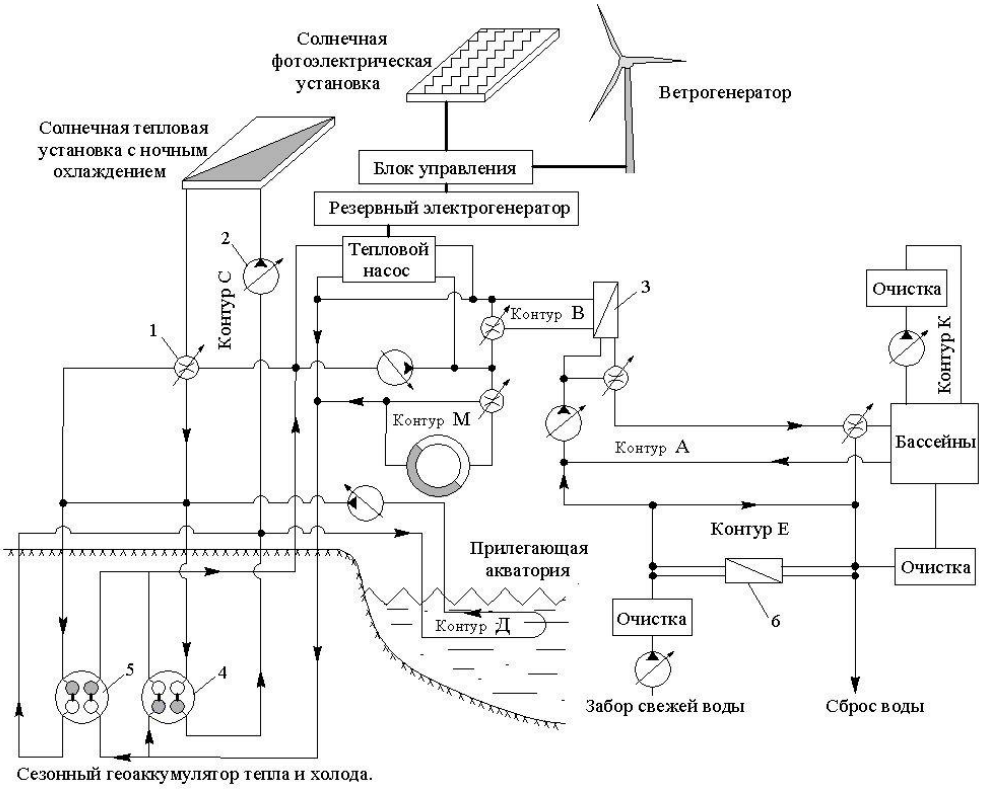


Рис.1. Функционально-технологическая схема комбинированной системыводоподготовки и энергообеспечения автономного объекта марикультуры:
1 - управляющий термоклапан; 2- насос циркуляционный; 3- плоский теплообменник; 4- зонды сектора нагрева; 5- зонды сектора охлаждения; 6- рекуператор (утилизатор тепла) ; контур А- термостатированный, циркуляционный, нагрева морской воды для водообмена бассейнов; контур В - термостатированный нагрева-охлаждения теплоносителя для бассейнов и системы отопления; контур С - термостатированный, прямого солнечного нагрева теплоносителя, ночного охлаждения и аккумуляции тепла (холода); контур Д - отбор тепла и холода поверхностных вод прилегающей акватории для аккумуляции тепла (холода); контур Е - циркуляция свежей морской воды для водообмена бассейнов, разбавление сбросной воды, отбор теплоты рекуператором; контур К – фильтрационная очистка, экологическая нормализация воды в бассейнах; контур М – отопление (охлаждение) воздуха здания цеха.

Рассчитаны тепловые потери для объекта (цеха), расположенного на побережье залива Восток (залив Петра Великого), и затраты на нагрев морской воды в бассейнах, которые в сумме составили 122 МВт·час/год. Брались ряды наблюдений температуры воздуха и термического режима морской воды на глубине 10 м за последние 30 лет [6]. Тепловая емкость используемого геотермального аккумулятора с учетом сезонных потерь тепла для района исследования составляет 105 МВт·час/год. Сектор нагрева аккумулятора состоит из 12 вертикальных скважинных зондов длиной 60м.

На рисунке 2 представлены данные тепловых потерь здания цеха, доли солнечной энергии в теплоснабжении объекта, вырабатываемой СНУ с грунтовым аккумулятором, и затраты тепловой энергии на нагрев воды в бассейнах. При заданных режимах нагрева морской воды в бассейнах (таб.1) и ее замены в системе 20 м^3 в сутки солнечная тепловая установка с грунтовым аккумулятором полностью обеспечивает энергетические затраты на нагрев морской воды в бассейнах при среднестатистических тепловых потерях помещения здания объекта в различные временные периоды года (рис.2).

Таблица 1. Температурные режимы в бассейнах, в море (глубина 10 м) и затраты тепловой энергии на нагрев морской воды в бассейнах

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
t^0C воды в бассейнах	14	14	14	14	18	20	20	20	18	14	14	14
t^0C в море по [6]	-1,2	-1,2	-0,3	2,3	5,0	8,3	13,2	16,8	14,2	10,0	4,6	2,3
МВ·ч*	3,68	3,28	3,37	2,7	2,9	2,4	2,25	1,2	1,64	1,92	2,3	2,9

*Расчетная тепловая энергия для нагрева воды (200м^3) в бассейнах.

Для компенсации общих тепловых потерь объекта дополнительное тепло для нагрева воды в бассейнах и отопления воздуха помещения цеха аккумулируется в грунтовой аккумулятор в теплые периоды годового сезона с помощью системы отбора тепла из акватории (контур Д рис.1). Система отбора тепла (холода) из морской акватории работает согласно текущему состоянию температур теплоносителя скважинных секторов и прогностическому расчету запаса энергообеспечения для технологического цикла. Анализ многолетних наблюдений температурного режима вод залива Восток приведенные в работе [6], показал возможность отбора тепловой энергии с поверхности акватории в период со второй декады мая по первую декаду ноября при среднемноголетних температурах поверхностных вод (0-5 м) 15-24^{0}С и максимальных значениях этого показателя 26^0 С (август).

Предлагаемая технология автономного энергообеспечения объекта (цеха) марикультуры позволяет:

- использовать экологически чистые энергоресурсы возобновляемых источников энергии (ветра, солнца) для энергообеспечения систем водоподготовки хозяйственного объекта в условиях побережья залива Петра Великого (Японское море);
- проводить процесс выращивания гидробионтов в круглогодичном цикле в не зависимости от климатических условий региона;
- существенно снизить загрязнение окружающей среды.

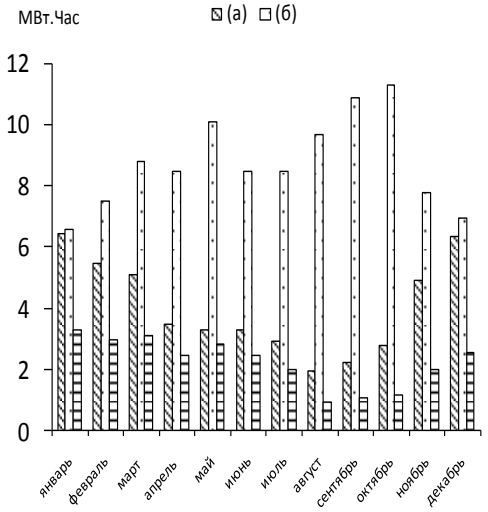


Рис. 2. Количество тепловых потерь объекта (а), доля солнечной энергии в теплоснабжении объекта (б) и затраты теплоты для подогрева морской воды в бассейнах (в).

Литература

1. Молотков В.Е., Волков А.В. Возобновляемые источники энергии в гидротехнических системах культивирования морских гидробионтов // Вестник ДВО РАН. Владивосток, 2008. №3 С. 105-111.

2. Ковалев О.П., Волков А.В., Лощенков В.В. Использование солнечной энергии в Приморском крае // Вестн. ДВО РАН. 2001. № 5. С. 293-298.

3. Молотков В.Е., Подкорытов Г.Ф. Перспективы использования возобновляемых источников энергии для энергообеспечения автономных хозяйственных объектов АПК в Приморском крае на примере морской аквакультуры // Материалы IV Междун. экологического форума «Природа без границ» г. Владивосток 6-8 Октября 2009. Владивосток: Из-во «РЕЯ», 2009. С.219-221.

4. Слесаренко В.В., Копылов В.В., Княжев В.В. Оценка эффективности установок солнечной энергетики в системах теплоснабжения // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С.125-130.

5. Богословский В.Н., Сканави А.Н. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч. 1. Отопление. М.: Стройиздат, 1990. -344 с.

6. Гайко Л.А. Особенности гидрометеорологического режима прибрежной зоны залива Петра Великого (Японское море). Владивосток: Дальнаука, 2005. -150 с.

СОВРЕМЕННЫЕ НЕФТЕСБОРОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

А.А. Шалагинов

ООО «Научно-исследовательский институт морских систем»,
Пискаревский проспект, дом 10 кв. 62, г. Санкт-Петербург, 195221, Россия.
Тел./факс: (812) 225-56-68; E-mail: rimsinc@mail.ru

Б.П. Пшеничный

Государственный международный университет природы, общества и человека Дубна (Филиал Угреша) , 140090 Московская область, г. Дзержинский, ул. Академика Жукова, д. 24, Россия. E-mail: pbp50@mail.ru

Приводятся сведения о разработанных устройствах для сбора в резервуар нефтяных загрязнений с поверхности водоемов, использующих для своей работы, как энергию волн, так и энергию маломощного двигателя. Устройства могут быть использованы для сбора нефтяных загрязнений и улучшения экологического состояния акваторий как в открытом море и в прибрежной зоне, так и в портах и нефтебазах.

Загрязнения водоемов нефтепродуктами становится в настоящее время одной из главных проблем, требующей разрешения. Увеличение транспорта нефти увеличивает риски, связанные с разливами нефтепродуктов в водоемах. Одной из главных задач при ликвидации последствий разливов нефтепродуктов является предотвращение растекания нефтяного загрязнения по поверхности водоемов на большие акватории. Не менее важной задачей является сбор разлившихся по поверхности воды нефтепродуктов, представляющих собой поверхностную пленку.

Для предотвращения растекания нефти и сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоемов существует большое количество устройств, начиная от всевозможных бонов, ограждающих загрязненную акваторию, до устройств, собирающих нефтяное загрязнение в различные емкости, так называемых скиммеров. Для ликвидации такого загрязнения применяются также всевозможные сорбенты.

Большинство устройств для сбора нефти с поверхности водоемов представляют собой механические или электрические насосы, для работы которых используются традиционные источники энергии. Такие устройства, как правило, дорогостоящие, громоздкие, требуют постоянного технического обслуживания, подводки коммуникаций. Часто такие устройства не могут быть быстро доставлены к месту разлива нефти, а также использоваться в штормовую погоду. Их работа может загрязнять окружающую среду, что делает их применение сложным и снижает эффективность.

Для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоемов нами разработано устройство, использующее энергию поверхностных волн водоемов [1]. Устройство представляет собой открытый с обоих концов резервуар, который подвешивается с бортов раскачивающегося на волнах предмета (с лодки, плотика), или с неподвижного (с причала, мола). Внутри резервуара устройства устанавливается плавучий клапан, имеющий выпуклую, сферическую форму, который в своем верхнем положении «садится» на круговой обод. Совершая на волнах движения вверх-вниз, верхний край резервуара такого устройства периодически пересекает урез воды – то выходит над поверхностью водоема, то погружается под воду. В соответствии с движениями резервуара вверх-вниз, плавучий клапан то открывает резервуар, давая возможность нефтяному загрязнению с поверхности водоема поступить в него, то закрывает резервуар и не дает возможности загрязнению вылиться из резервуара на поверхность. Вода, поступившая в резервуар вместе с нефтяным загрязнением с поверхности

водоема, выливается через его нижний край, а нефтяное загрязнение накапливается под плавучим клапаном. Многократно пересекая урез воды на волнах, описанное выше устройство собирает нефтяное загрязнение с поверхности водоема в резервуар до его заполнения.

С целью усовершенствования данной конструкции нами были разработаны устройства для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоемов, которые собирают разлившуюся нефть в резервуары с клапанами. Резервуары этих устройств также подвешиваются в водоеме с каких-либо предметов и, качаясь на волнах, пересекают поверхность водоема, покрытую нефтяным загрязнением, собирая его в резервуар под плавучий клапан.

Резервуар одного из таких устройств оборудован с внутренней стороны направляющими [2], обеспечивающими плавный ход плавучего клапана и плотное прилегание («прижимание») клапана к посадочному месту, препятствуя его перекосам и возможности заклинивания.

Отличительным признаком другого устройства является наличие смотровых окон, расположенных по бокам резервуара [3]. Наличие смотровых окон позволяет, осуществлять визуальный контроль за заполнением резервуара нефтяным загрязнением во время работы.

В другом нашем устройстве на верхней поверхности резервуара в центре плавучего клапана имеется сквозное отверстие, закрывающееся крышкой на резьбе [4]. Это отверстие предназначено для откачивания из резервуара нефтяного загрязнения. При заполнении резервуара нефтяным загрязнением в отверстие просовывается шланг, по которому нефтяное загрязнение откачивается из резервуара в какую-нибудь емкость. Это приспособление значительно упрощает удаление нефтяного загрязнения из резервуара.

В следующем нашем устройстве для упрощения определения точного времени заполнения резервуара нефтяным загрязнением на внутренней стенке резервуара имеются датчики фиксирующие и передающие информацию о заполнении резервуара и необходимости откачивания нефтяного загрязнения из резервуара [5]. Это приспособление позволяет с высокой точностью определить время заполнения резервуара нефтяным загрязнением и производить его откачивание из резервуара.

Для увеличения рабочей площади сбора нефтяного загрязнения резервуар другого устройства для сбора нефтяного загрязнения может быть оборудован раструбом [6]. Кольцевой раструб позволяет захватывать загрязнение с большей площади водоема, что повышает производительность устройства на 10-20%.

Нами разработаны еще два устройства для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоемов, которые также состоят из резервуара с плавучими клапанами и также используют для своей работы энергию волн водоемов. Резервуары таких устройств, в отличие от вышеупомянутых устройств не подвешиваются с какого-либо предмета, а удерживаются на поверхности водоема поплавковыми поясами [7,8], укрепленными снаружи резервуаров в его верхней части. Поплавковые пояса удерживают резервуары устройств на поверхности водоема (на плаву) и, в соответствии с движением волн, позволяют его верхним краям периодически пересекать урез воды – то выходить над поверхностью водоема, то погружаться под воду. Также как и в вышеупомянутых устройствах, в соответствии с движениями резервуара вверх-вниз, плавучий клапан то открывает резервуар, давая возможность нефтяному загрязнению с поверхности водоема поступить в него, то закрывает резервуар и не дает возможности загрязнению вылиться из резервуара на поверхность водоема.

Преимущество таких устройств состоит в том, что их не надо подвешивать с какого-либо предмета. Такие устройства могут быть «выброшены» в разлившееся нефтяное пятно, например с судна или с вертолета. Благодаря расчетному центру тяжести, резервуары таких устройств принимают в воде вертикальное положение, а поплавковый пояс удерживает резервуар устройства на поверхности водоема и позволяет его верхнему краю периодически пересекать урез воды и, таким образом собирать нефтяное загрязнение с поверхности водоема.

Для увеличения производительности и повышения надежности работы устройств нами разработано автономное волновое нефтесборочное устройство [9]. Особенностью данной конструкции является то, что оно имеет шесть резервуаров, систему контроля состоящую из датчиков наполнения и датчиков очистки и одну общую магистральную трубу с эвакуационными трубками в каждый резервуар, проходящую по длине общего поплавкового основания и централизованный отвод нефтяного загрязнения через один из концов магистральной трубы.

Все описанные выше устройства имеют простую конструкцию, не потребляют традиционных источников энергии, не требуют технического обслуживания и подводки коммуникаций и не загрязняют окружающую среду. Для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоемов они используют энергию волн и могут работать в водоемах при волнении, что дает им ряд преимуществ.

Однако, в некоторых случаях представляется важным обеспечить работу таких устройств в штилевую погоду. Для сбора нефтяного загрязнения при отсутствии волнения в водоеме, разработанные нами устройства могут быть установлены на плавучих платформах (рамах с поплавками). В этом случае движение резервуаров устройств вверх-вниз (под воду и над водой) может обеспечиваться маломощным двигателем [10].

Разработанные устройства могут найти применение, как для сбора нефтяного загрязнения, так и для сбора плавучего мусора с поверхности водоемов. Они могут быть использованы также для сбора сорбентов, используемых для ликвидации загрязнителей, что также является важной проблемой. Такие устройства могут быть использованы как в открытом море и в прибрежной зоне, так и в портах, на нефтебазах и т.д.

Нам представляется, что разработка и создание всевозможных устройств для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоемов, должны быть одними из приоритетных направлений исследований, решение которых будет способствовать снижению загрязнения водоемов и улучшению их экологического состояния. Такие устройства должны быть простыми по конструкции, недорогостоящими, легкими и мобильными. Они должны храниться в организациях, отвечающих за чистоту водоемов, или за ликвидацию аварийных разливов нефти (ЛАРН) и оперативно доставляться в районы нефтяных загрязнений.

Литература

1. Пшеничный Б.П., Свидетельство РФ на полезную модель № 6809. Устройство для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоемов. Приоритет: 29.04.1997, Опубл. 16.06.1998 Бюл. № 6.
2. Шалагинов А.А., Грачев И.М., Пшеничный Б.П., Патент РФ на полезную модель № 77297. Устройство для сбора загрязнений с поверхности водоема. Приоритет: 18.04.2008, Опубл. 20.10.2009 Бюл. № 29.
3. Шалагинов А.А., Грачев И.М., Пшеничный Б.П., Патент РФ на полезную модель № 76349. Устройство для сбора нефтяных загрязнений с поверхности водоема. Приоритет: 18.04.2008, Опубл. 20.09.2009 Бюл. № 26.
4. Шалагинов А.А., Грачев И.М., Пшеничный Б.П., Патент РФ на полезную модель № 76350. Устройство для сбора нефтяных загрязнений с поверхности водоема. Приоритет: 18.04.2008, Опубл. 20.09.2009 Бюл. № 26.
5. Шалагинов А.А., Шалагинова А.И., Пшеничный Б.П., Патент РФ на полезную модель № 90807. Устройство для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоема. Приоритет: 30.06.2009, Опубл. 20.01.2010 Бюл. № 2.
6. Шалагинов А.А., Шалагинова А.И., Пшеничный Б.П., Патент РФ на полезную модель № 89537. Устройство для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоема. Приоритет: 30.06.2009, Опубл. 10.12.2009 Бюл. № 34.

7. Шалагинов А.А., Грачев И.М., Пшеничный Б.П., Патент РФ на полезную модель № 81970. Устройство для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоема. Приоритет: 18.04.2008, Опубл. 10.04.2009 Бюл. № 10.

8. Шалагинов А.А., Пшеничный Б.П., Патент РФ на полезную модель № 112911. Автономное устройство для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоема. Приоритет 12.08.2011, Опубл. 27.01.2012 Бюл. № 3.

9. Шалагинов А. А., Патент РФ на полезную модель № 113525. Автономное волновое нефтесборочное устройство. Приоритет 26.08.2011, Опубл. 20.02.2012 Бюл. № 5.

10. Бурцев П.Ю., Пшеничный Б.П., Шалагинов А.А., Патент РФ на полезную модель № 72985. Устройство для сбора нефтяного загрязнения с поверхности водоема. Приоритет: 29.12.2007, Опубл. 10.05.2008 Бюл. № 13.

ВЫБОР CAD/CAE/CAM – СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОДЯНОЙ ТУРБИНЫ ПОПЕРЕЧНОГО ПОТОКА (ТУРБИНЫ ЧЕБОКСАРОВА)

В.М. Кошеля

Дальневосточный федеральный университет
Инженерная школа
690091, Владивосток, ул. Пушкинская, 10
e-mail: vasilii_koshelya@mail.ru

В докладе представлен перечень инженерных задач, возникающих при проектировании водяной турбины поперечного потока (турбины Чебоксарова). Для их решения выбраны CAE и CAM – системы, обладающие достаточной функциональностью. Приведены некоторые промежуточные результаты решения инженерных задач в области гидродинамики и расчетов на прочность, а также проектирования технологии обработки.

Использование указанных систем необходимо в связи со сложностью объекта исследований и отсутствия существующих методов проектирования данного вида энергетических установок.

Рассматриваемая турбина поперечного потока относится к классу энергетических установок с вертикальной осью вращения и представлена на рис. 1. Конструкция водяной турбины позволяет преобразовать энергию текучей среды в механическую энергию вращения вала, соединенного с генератором. Она может работать как в воздушной, так и в водной среде. Использование данной установки в водной среде предпочтительно с точки зрения удобства наблюдения за характером обтекания лопастей потоком текучей жидкости, а также ожидаемого более высокого значения энергоэффективности (C_p). Лопасти, рассматриваемой водяной турбины, самоустанавливающиеся по потоку жидкости.

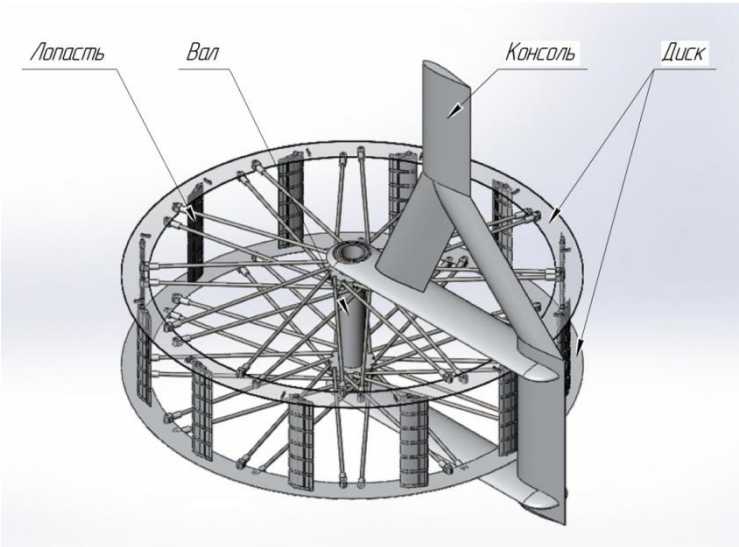


Рис. 1 Водяная турбина поперечного потока

Для достижения максимального значения C_p, обеспечения надежной работы всех элементов водяной турбины и технологичности изготовления элементов со сложной фасонной формой необходимо решить ряд инженерных задач в области гидродинамики, прочности, кинематики и проектирования технологии обработки. Для ускорения процесса проектирования и решения инженерных задач конструкцию рассматриваемой водяной турбины предложено разделить на четыре отдельных узла (см. рис. 1) – массив лопастей, диски, соединенные между собой валом, механизмы согласованного поворота лопастей и закрылков, образующие ротор водяной турбины, а также консоли. Недостатком данного

решения является необходимость задания специфических граничных условий способных повлиять на точность и достоверность решения инженерных задач.

На первоначальном этапе исследований необходимо решить инженерные задачи следующих разделов:

- Гидродинамика
  - Обтекание ротора водяной турбины (по отдельным элементам)
  - Обтекание профиля лопасти
  - Обтекание консоли
- Расчет на прочность
  - Анализ напряжено-деформированного состояния
  - Расчет срока службы
  - Расчет собственных частот колебаний
- Кинематика
  - Кинематика и прочность механизма согласованного поворота лопасти и закрылка
- Проектирование технологии обработки
  - Проектирование технологии обработки деталей со сложной фасонной формой

Из-за того, что элементы рассматриваемой водяной турбины имеют сложную форму данные инженерные задачи можно решить только с применением CAE и CAM – систем. При этом желательно решать вышеуказанные инженерные задачи с применением одного программного комплекса, обладающего достаточными функциональными возможностями. Это позволит избежать проблем связанных с импортом/экспортом геометрических моделей и полученных расчетных данных.

Рынок программного обеспечения на сегодняшний день предлагает большое количество CAD – систем, состав которых может быть дополнен CAE и CAM модулями. По функциональным возможностям существующие CAD – системы делятся на: системы начального, среднего и высокого уровня [2]. Для решения инженерных задач, возникающих при проектировании водяной турбины поперечного потока, наибольший интерес представляют системы среднего уровня, так по функциональным возможностям они мало уступают системам высокого уровня, а по удобству интерфейса и простоте освоения их превосходят [2].

Среди систем среднего уровня для исследования применимости к решению инженерных задач, возникающих при проектировании водяной турбины, выбран программный комплекс SolidWorks, который может быть дополнен модулями для решения задач газогидродинамики – Flow Simulation, расчетов на прочность – Simulation, кинематики – Motion и проектирования технологии обработки CAMWorks или SolidCAM.

При анализе применимости модуля Flow Simulation для решения задач гидродинамики была проведена серия экспериментов. В результате установлено, что данный программный модуль не способен решить гидродинамическую задачу, в случае воздействия набегающего потока жидкости в радиальном направлении относительно исследуемого вращающегося тела [1]. Поэтому потребовался программный продукт, обладающий более широкими функциональными возможностями. Из существующих на сегодняшний день систем полнофункционального инженерного анализа был выбран Ansys Fluent. В ходе решения гидродинамической задачи обтекания узлов ротора водяной турбины в CAE - систему Ansys Fluent была импортирована расчетная сетка, построенная на основании твердотельной геометрической модели созданной в CAD - системе SolidWorks.

При решении задач расчетов на прочность использованы данные полученные при решении задач гидродинамики. В качестве граничных условий указывались составляющие гидродинамических сил, действующих на узлы водяной турбины поперечного потока, в декартовой системе координат, значение которых было получено при решении гидродинамических задач с применением программного продукта Ansys Fluent. Благодаря

возможности экспорта расчетных данных из модуля газогидродамики Flow Simulation в модуль расчета на прочность Simulation, в качестве граничного условия указывалось воздействия потока жидкости. Данное граничное условие, возможно, использовать для всех видов задач расчетов на прочность. В результате решения задач расчетов на прочность получена серия эпюр напряжения (рис. 2), перемещения (рис. 3), срока службы (рис. 4), форм собственных частот колебаний (рис. 5) и т.д. Они показывают, что программный модуль Simulation программного комплекса SolidWorks обладает достаточной функциональностью для решения задач расчетов на прочность, возникающих при проектировании водяной турбины поперечного потока.

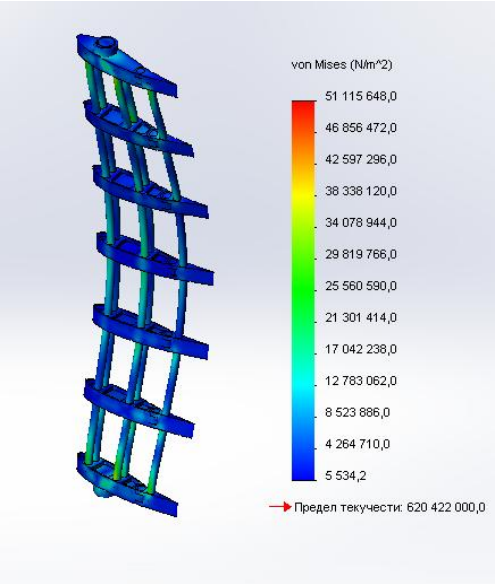


Рис. 2 Эпюра напряжения

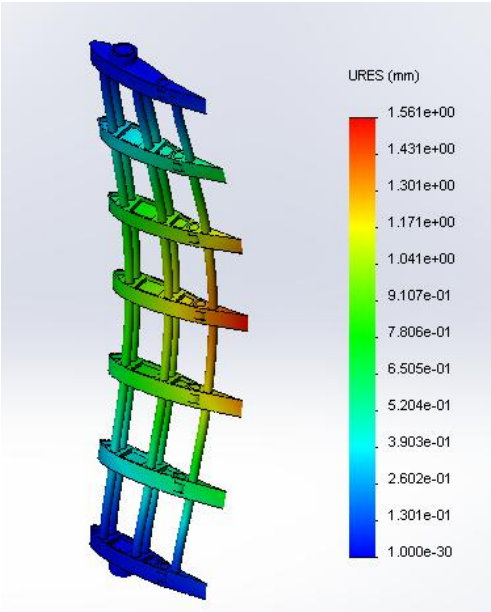


Рис. 3 Эпюра перемещения

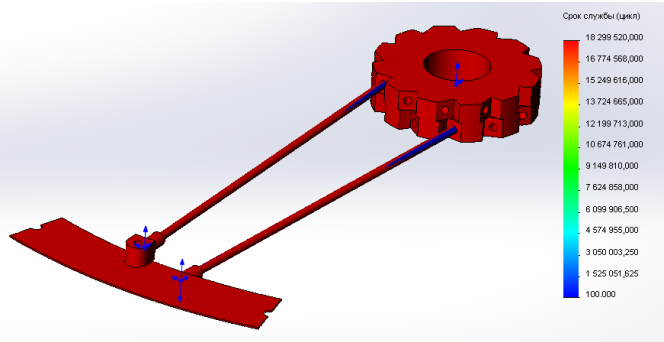


Рис. 4 Эпюра срока службы

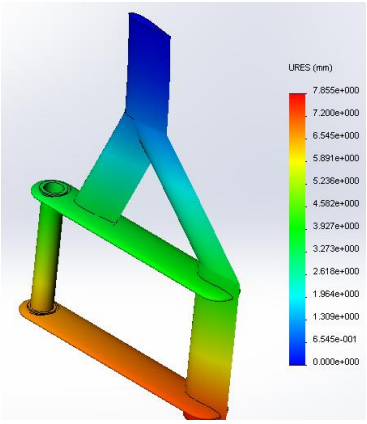


Рис. 5 Эпюра форм собственных частот колебаний

Используя программный модуль Motion программного комплекса SolidWorks, была решена задача кинематики и прочности механизмов согласованного поворота лопастей и закрылков. В результате решения данной задачи была проверена правильность его работы, а также проведено исследование изменения уровня напряжения. Используя функциональные возможности программного модуля Motion и возможность экспорта данных в модуль Simulation, были решены задачи на прочность рассматриваемого механизма.

При проектировании технологии обработки необходимо было получить управляющие программы (УП) для станков с ЧПУ для тех элементов водяной турбины, которые не могут быть изготовлены на станках с ручным приводом. К таким элементам является, к примеру, корневая часть нервюры лопасти. Форма сечения, которой образована аэродинамическим профилем, предъявляющим высокие требования к точности изготовления. Данная задача была решена с применением программного продукта SolidCAM, который может быть импортирован в программный комплекс SolidWorks и имеет общий с ним интерфейс. Результат проектирования технологии обработки может быть представлен в виде траектории движения инструмента, либо по средствам ее визуализации с количеством требуемого времени на механическую обработку.

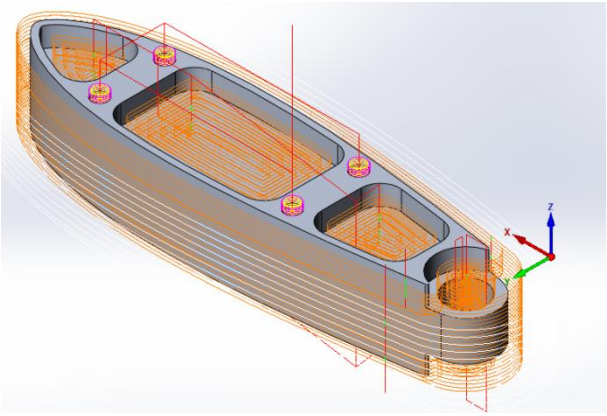


Рис. 6. Траектория движения инструмента

Таким образом, показано, что большинство инженерных задач, возникающих при проектировании водяной турбины поперечного потока (турбина Чебоксарова) может быть решено с применением программного комплекса SolidWorks в составе которого должны быть модули газогидродинамики – Flow Simulation, расчетов на прочность – Simulation и кинематики – Motion. Для решения задач гидродинамики обтекания узлов ротора требуется

использовать программный продукт – Ansys Fluent. Технология обработки деталей со сложной фасонной формой на станках с ЧПУ может быть спроектирована в САМ – системах SolidCAM или CAMWorks.

Литература

1. Кошеля В.М. Чебоксаров В.В. Анализ применимости модуля SolidWorks Flow Simulation для проектирования водяной турбины поперечного потока// ВОЛОГДИНСКИЕ ЧТЕНИЯ Материалы научной конференции Владивосток, 2012 / Дальневост. федерал. ун-т, Инженерная школа. Владивосток, 2013. С. 159–162. URL: http://www.dvfu.ru/documents/41440/1451227/Вологдинские%20чтения-2013.pdf.
2. САПР Машиностроение - САПР CAD \ CAM \ CAE Системы Черчение 3D Моделирование [Электронный ресурс] // САПР Машиностроение (CAD): - электрон. журнал. – Режим доступа: http://rucadcam.ru/index/sapr_mashinostroenie/0-4

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БУХТЫ ДИОМИД

М.З. Ермолицкая

Институт проблем морских технологий ДВО РАН
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс: (423)2432416,
e-mail: erm@marine.febras.ru

В докладе приводятся результаты исследования состояния вод и донных отложений бухты Диомид за период с 2004 по 2011 гг. Выявлено, что качество воды за рассматриваемый период ухудшилось. По ИЗВ морские воды залива в 2011 г. относятся к VI классу - очень грязная вода.

Бухта Диомид расположена на северном побережье пролива Босфор Восточный залива Петра Великого к востоку от входа в бухту Золотой Рог между мысами Голдобина и Абросимова. Бухта является морской промышленной зона г.Владивостока, где расположены предприятия, судоремонтные заводы, портовые причалы и склады.

Исследование состояния вод и донных отложений бухты Диомид проводилось по данным наблюдений Центра мониторинга загрязнения окружающей среды Примгидромета и институтов ДВО РАН за период с 2004 по 2011 гг. [1, 2]. Статистический анализ данных проводился с использованием табличного процессора Microsoft Office Excel. Превышение допустимых уровней концентраций (ДК) загрязняющих веществ рассчитывалось по критериям экологической оценки загрязненности грунтов — «голландским листам» (нормы Neue Niderlandische Liste Altlasten Spektrum 3/95).

Уровень загрязненности морских вод бухты Диомид нефтепродуктами за рассматриваемый период в среднем изменялся в пределах от 1,8 ПДК до 3 ПДК, за исключением 2008 и 2011гг., когда среднегодовые концентрации составляли 8,2 и 9,6 ПДК соответственно (рис. 1). По визуальным данным акватория бухты была покрыта нефтяной пленкой интенсивностью 1-3 балла и бытовым мусором.

Значение среднегодовых концентраций фенолов постепенно уменьшается. Максимальное превышение ПДК наблюдалось в 2004 г. в 4 раза, минимальное – в 2010 г. в 1,1 раз (рис. 1).

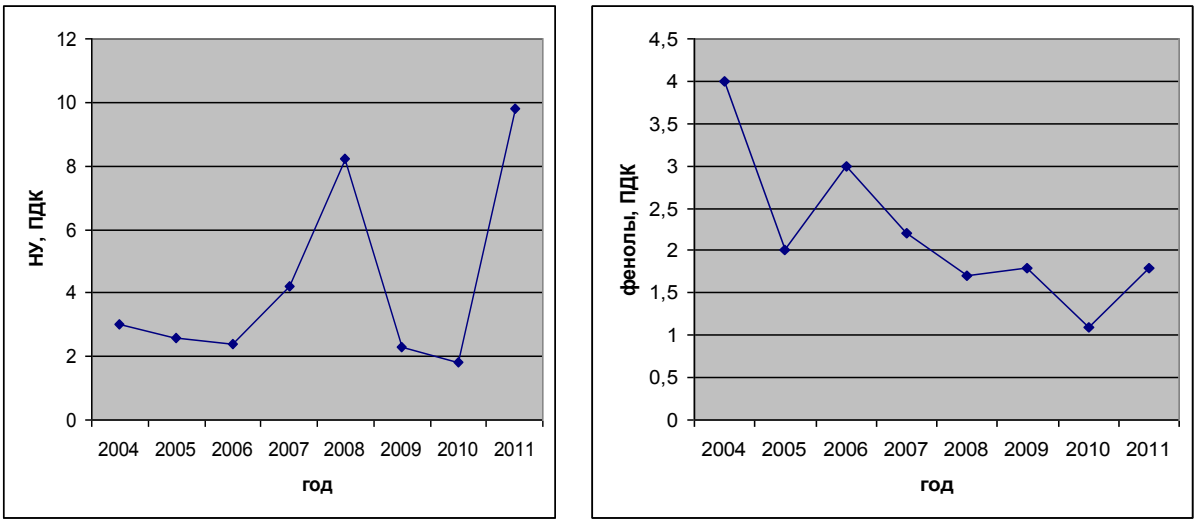


Рис. 1. Распределение среднегодовых концентраций нефтеуглеводородов и фенолов в водах бухты Диомид

Среднегодовые концентрации свинца, кадмия, кобальта, никеля, цинка, железа, марганца и хрома в основном не превышали ПДК. Наибольшие максимальные значения концентраций наблюдались по свинцу в 2006 г. (1,6 ПДК), по кадмию – в 2007 г. (1,5 ПДК), по цинку – в 2008 г. (2,1 ПДК), по железу – в 2006 г. (10 ПДК).

С 2004 по 2006 гг. среднегодовые концентрации ртути изменялись в пределах 0,3-0,6 ПДК, максимальные – 1 ПДК. С 2007 г. наблюдаются случаи высокого загрязнения с превышением ПДК в 3 (2007 г.) и 4,1 раз (2009 г.).

Уровень загрязненности вод залива хлорорганическими пестицидами в среднем не превышал 0,1 ПДК. Максимальное значение α-ГХЦГ, равное 1,4 ПДК, наблюдалось в 2008 г. Превышение ПДК в 1,2 раза по ДДТ зафиксировано в 2005 г., в 1,4 раза по ДДЭ – в 2011 г. Суммарное количество ДДТ, ДДЭ, ДДД в 2011 г. превысило 2 ПДК.

Среднегодовые концентрации растворенного кислорода изменялись в пределах 8,41мг/л (93,1% насыщения в 2006 г.) – 10,06 мг/л (11,4% насыщения в 2011 г.).

Изменения качества вод бухты Диомид по индексу загрязненности воды приведены в таблице 1. В 2011 г. ИЗВ составил 3,24 (VI класс)– очень грязная вода.

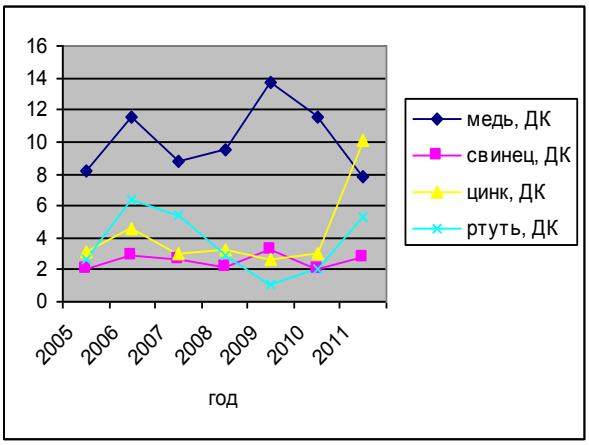
Таблица 1. Качество морских вод бухты Диомид по ИЗВ

Год	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Класс	IV	IV	V	V	IV	III	VI

В донных отложениях исследуемой бухты с 2004 по 2007 гг. наблюдалось увеличение содержания нефтяных углеводородов, при этом превышение допустимого уровня концентраций составляло 106,8 раз (максимальное – 169,2 раза). В 2008 году произошло уменьшение концентрации до 56 ДК (максимальное 62 ДК), в 2009 г. увеличение до 133,2 ДК (максимальное 150 ДК), далее уменьшение до 89,4 ДК (максимальное 97,6 ДК) в 2011 г.

Среднегодовые концентрации фенолов в донных отложениях залива в рассматриваемый период изменялись следующим образом: с 2005 по 2007 гг. наблюдалось увеличение с 3,62 мкг/г с.о. до 11 мкг/г с.о., затем снижение концентрации до 3,8 мкг/г с.о. в 2009 г. В 2010 г. значение среднегодовой концентрации равнялось 4,6 мкг/г с.о., в 2011 г. – 3 мкг/г с.о.

Донные отложения бухты Диомид в значительной степени загрязнены соединениями токсичных металлов. Изменения рассчитанных значений среднегодовых концентраций меди, свинца, цинка, ртути и марганца представлены на рисунке 2.



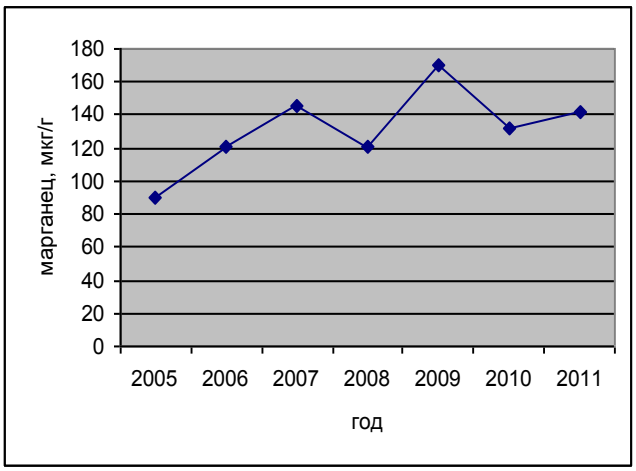


Рис. 2. Среднегодовые концентрации отдельных загрязняющих веществ в донных отложениях бухты Диомид

Превышение допустимого уровня кадмия в донных отложениях колебалось в пределах от 3,3 (2011 г.) до 5,1 раз (2006 г.). Превышение ДК в 10,3 раз наблюдалось в 2009 г.

Превышение допустимого уровня кобальта в донных отложениях бухты в среднем составляло 0,25 ДК, лишь в 2011 г. – в 1,6 ДК. Превышение допустимого уровня никеля в донных отложениях в среднем составляло 0,5 ДК. Среднегодовое содержание железа в донных отложениях бухты находилось в пределах от 32083 мкг/г (2006 г.) до 34560 мкг/г (2008 г.). Максимальная среднегодовая концентрация железа зафиксирована в 2009 г. (45574 мкг/г).

В целом, 2011 г. в донных отложениях бухты содержание таких токсичных металлов, как медь, свинец, марганец, кобальт и ртуть возросло, кадмия – снизилось. Концентрация никеля и железа осталась на прежнем уровне [3].

Таким образом, несмотря на то, что концентрации отдельных загрязняющих веществ снижаются, воды бухты Диомид по-прежнему подвергаются антропогенному воздействию. Продолжается накопление загрязняющих веществ в донных отложениях. Качество вод бухты в 2011 г. ухудшилось и по индексу загрязненности воды относится к VI классу – очень грязная вода.

Литература

1. Официальный сайт Приморского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды - http://www.primgidromet.ru.
2. Природопользование, состояние и тенденции изменений морской среды прибрежных районов России в Японском море // Информационные ресурсы ТОИ ДВО РАН. Океанография, 2010. Т.11.
3. Администрация Приморского края. Доклад об экологической ситуации в Приморском крае в 2011 году. Владивосток, 2012. С. 73.