

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ISSN 1992-4429

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА

2021

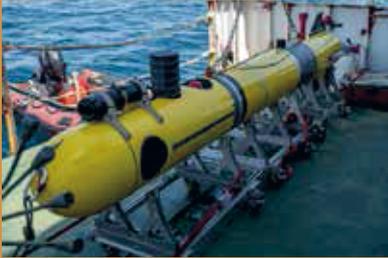
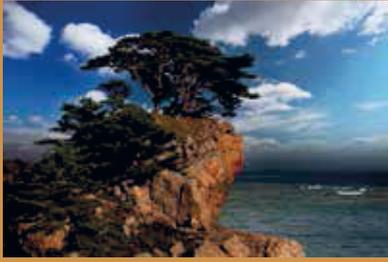
Глубины океана ~ наша гигантская лаборатория

№ 2 (36)

UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ О ПРОБЛЕМАХ ОСВОЕНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

БОБКОВ

Валерий Александрович –

д.т.н., ФГБУН Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ЗЛОБИНА

Надежда Владимировна –

д.т.н., ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ИЛЛАРИОНОВ

Геннадий Юрьевич –

д.т.н., ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ИНЗАРЦЕВ

Александр Вячеславович –

д.т.н., ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

КАСАТКИН

Борис Анатольевич –

д.ф.-м.н., ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

МАТВИЕНКО

Юрий Викторович –

д.т.н., ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

МОРГУНОВ

Юрий Николаевич –

д.т.н., ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ОБЖИРОВ

Анатолий Иванович –

д.г.-м.н., профессор, ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

АКУЛИЧЕВ

Виктор Анатольевич –

академик РАН, профессор, ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

БЫЧКОВ

Игорь Вячеславович –

академик РАН, профессор, ФГБУН Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

ВАСИЛЬЕВ

Станислав Николаевич –

академик РАН, профессор, ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация

ВЕЛЬТИЦЕВ

Вадим Викторович –

д.т.н., профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация

ДОЛГИХ

Григорий Иванович –

академик РАН, профессор, ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

КАЛЯЕВ

Игорь Анатольевич –

академик РАН, НИИ МВС ЮФУ, г. Ростов-на Дону, Российская Федерация

КЕБКАЛ

Константин Георгиевич –

д.т.н., EvoLogics GmbH, Berlin, Germany

КУЛЬЧИН

Юрий Николаевич –

академик РАН, ФГБУН Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

ПШИХОПОВ

Вячеслав Хасанович –

д.т.н., профессор, НИИ робототехники и процессов управления ЮФУ, г. Ростов-на Дону, Российская Федерация

СЕЛЕЗНЕВ

Игорь Александрович –

д.т.н., АО «Концерн «Океанприбор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

СЕРГИЕНКО

Валентин Иванович –

академик РАН, профессор, Президиум ДВО РАН, г. Владивосток, Российская Федерация

СТЕПАНОВ

Олег Андреевич –

чл.-корр. РАН, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
**Институт проблем морских технологий
Дальневосточного отделения
Российской академии наук**
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
FAR EASTERN BRANCH
Institute of Marine Technology Problems

ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА

UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS

№ 2 (36).2021

Учредители и издатели:

Федеральное государственное
бюджетное учреждение
«Дальневосточное отделение
Российской академии наук»
690091, г. Владивосток,
ул. Светланская, 50
Тел.: +7 (423) 222-06-52
E-mail: dvo@hq.febras.ru
<http://www.febras.ru>

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских
технологий Дальневосточного
отделения Российской
академии наук
690091, г. Владивосток
ул. Суханова, 5а
Тел.: +7 (423) 243-24-16
E-mail: imtp@marine.febras.ru
<http://www.imtp.febras.ru>

Адрес редакции:

690091, г. Владивосток
ул. Суханова, 5а
ИПМТ ДВО РАН
Тел.: +7 (423) 243-26-74
E-mail: kiselev@marine.febras.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной
службе по надзору в сфере связи, инфор-
мационных технологий и массовых ком-
муникаций (Роскомнадзор). Регистраци-
онное свидетельство: ПИ № ФС77-77237
от 25 ноября 2019 г.

Подписной индекс в электронном каталоге
АО «Почта России» ПМ285

Журнал входит в Перечень ведущих рецен-
зируемых журналов и изданий, в которых
должны быть опубликованы основные науч-
ные результаты диссертаций на соискание
ученой степени доктора и кандидата наук

© ДВО РАН, 2021
© ИПМТ ДВО РАН, 2021

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
О ПРОБЛЕМАХ ОСВОЕНИЯ МИРОВОГО ОКЕАНА

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
ABOUT EXPLORATION OCEAN PROBLEMS

Главный редактор

ЩЕРБАТЮК Александр Федорович – чл.-корр. РАН,
ФГБУН Институт проблем морских
технологий ДВО РАН, г. Владивосток,
Российская Федерация

Заместитель главного редактора

КИСЕЛЕВ Лев Владимирович – д.т.н.,
ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

Зав. редакцией, ответственный секретарь

МИРОМАНОВА Ирина Витальевна –
ФГБУН Институт проблем морских технологий ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

Редактор *В.С. Жердев*

Дата выхода в свет 25.06.2021 г.

Бумага мелованная. Формат 60x90/8. Печать офсетная.
Усл. п. л. 10,8. Уч.-изд. л. 9,24. Тираж 200 экз. Заказ ИВ 210767.
Цена свободная

ИП Сердюк Оксана Александровна
690065, Владивосток, ул. Стрельникова, 12-87.
Тел. +79147102232. E-mail: oksanaserdiuk62@gmail.com

Отпечатано в ЗАО «ЛИТ»
г. Владивосток, ул. Комсомольская, 1в

SYSTEMS, TECHNOLOGIES AND EXPERIMENTS

- 4 Luchin V.A., Golov A.A., Sheshegov A.V., Dubina V.A., Morgunov Yu.N.
Application of long-term arrays of oceanological data and reference hydroacoustic signals for refining the method of calculating the effective sound speed on acoustic paths in the sea of Okhotsk

MODELS, ALGORITHMS AND SOFTWARE

- 18 Konoplin A.Yu., Yurmanov A.P.
Support system for operator of manipulator mounted on underwater vehicle
- 28 Kaplunenko D.D., Dubina V.A., Morgunov Yu.N., Golov A.A.
The augmentation of horizontal fields of sound speed in the Sea of Japan using satellite data

SEA TECHNOLOGY FACILITY AND METHODS OF UNDERWATER RESEARCH

- 41 Kasatkin B.A., Kosarev G.V.
Experience of application of acoustic profilograph with synthesized aperture for searching for small objects in the sea bottom
- 47 Shchurov V.A., Shcheglov S.G., Lyashkov A.S., Tkachenko E.S.
Ocean fundamental phenomena defined by vector nature of acoustic intensity
- 57 Biriukov I.R., Petukhova M.N.
On the question of radiation impedance for two-sided disk transducers located near the acoustic screen
- 66 Kozitskiy S.B., Kozitskaya I.S.
Electromagnetic fields induced by surface ring waves in the deep sea

SHORT COMMUNICATIONS

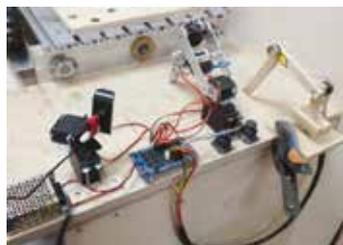
- 76 Kazak M.S., Petrov P.S., Koshel K.V.
The study of acoustic modes back-scattering by bottom relief inhomogeneities using the invariant imbedding method

UNDERWATER ROBOTICS NEWS

- 82 Review by D.G. Lyakhov
- 83 To the 90th anniversary of Academician M. D. Ageev
- 84 In memory of Yuri Genievich Sebto

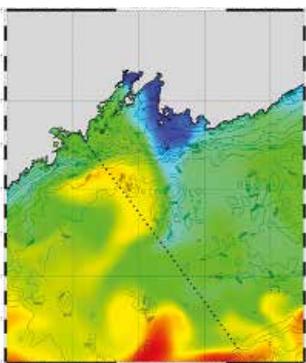


Стр. 23



Лабораторная установка

Стр. 33



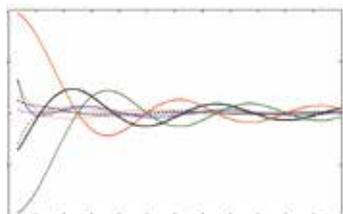
Фрагменты карт полей для разных параметров

Стр. 48



Комбинированный векторный приемник

Стр. 60



Сопротивления излучения поршневого преобразователя

СИСТЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

- 4 Лучин В.А., Голов А.А., Шешегов А.В., Дубина В.А., Моргунов Ю.Н. Использование массивов многолетних океанологических данных и опорных гидроакустических сигналов для уточнения методики расчета эффективной скорости звука на акустических трассах в Охотском море

МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

- 18 Коноплин А.Ю., Юрманов А.П. Система поддержки деятельности операторов манипуляторов, установленных на подводных аппаратах
- 28 Каплуненко Д.Д., Дубина В.А., Моргунов Ю.Н., Голов А.А. Восстановление горизонтальных полей скорости звука в Японском море на основе спутниковых и модельных данных

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

- 41 Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Опыт применения акустического профилографа с синтезированной апертурой для поиска малоразмерных объектов в морском дне
- 47 Щуров В.А., Щеглов С.Г., Ляшков А.С., Ткаченко Е.С. Фундаментальные явления в океане, обусловленные векторной природой акустической интенсивности
- 57 Бирюков И.Р., Петухова М.Н. К вопросу о сопротивлении излучения двухсторонних дисковых преобразователей, расположенных на фоне акустического экрана
- 66 Козицкий С.Б., Козицкая И.С. Электромагнитные поля, индуцированные поверхностными кольцевыми волнами в глубоком море

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- 76 Казак М.С., Петров П.С., Кошель К.В. Исследование обратного рассеяния акустических мод на неоднородностях рельефа дна с использованием метода инвариантного погружения

НОВОСТИ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

- 82 Обзор Д.Г. Ляхова
- 83 К 90-летию академика М.Д. Агеева
- 84 Памяти Юрия Геньевича Себто

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАССИВОВ МНОГОЛЕТНИХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ОПОРНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ ЗВУКА НА АКУСТИЧЕСКИХ ТРАССАХ В ОХОТСКОМ МОРЕ

В.А. Лучин, А.А. Голов, А.В. Шешегов, В.А. Дубина, Ю.Н. Моргунов

Представлена многоуровневая методика расчета эффективной скорости звука на акустических трассах в Охотском море, которая базируется на использовании всей доступной океанологической информации с 1929 по 2020 г. и опорных гидроакустических сигналах. На основе многолетних массивов океанологических данных выявлены сезонные и межгодовые особенности формирования полей скорости звука в море, а также правила группировки и обработки исходных данных на акустических трассах. Разработано прогностическое уравнение (с заблаговременностью не менее 2 месяцев) для предсказания типа («теплый», «нормальный», «холодный») термического режима вод холодного подповерхностного слоя Охотского моря, в котором формируется подводный звуковой канал. В качестве предикторов прогностического уравнения используются межгодовые вариации климатических индексов атмосферы и океана, а также межгодовые изменения локальных параметров в системе атмосфера–лед–океан Охотского моря и прилегающих регионов суши, Тихого океана и Японского моря. Реализация методики существенно уменьшает погрешность расчетов эффективной скорости звука на акустических трассах по данным океанологических наблюдений. Ее использование будет наиболее востребовано в бортовом компьютере автономного подводного объекта, выполняющего миссию на сравнительно обширном полигоне с существенно изменяющимися гидрологическими условиями и значениями эффективной скорости звука на акустических трассах.

Ключевые слова: температура воды, эффективная скорость звука, подводный звуковой канал, океанологические данные, сезонная и межгодовая изменчивость.

Введение

Решение задачи позиционирования подводных объектов (ПО) с заданной точностью зависит от прогноза эффективной скорости звука в районе навигационного обеспечения (РНО). Это особенно актуально в случаях ограниченных гидрологических данных (отсутствие справочных или модельных данных, оперативной информации о параметрах звукового канала в местах размещения ПО и источников навигационных сигналов (ИНС)).

Корректная оценка дальности между ИНС и ПО возможна только при наличии наиболее точных значений скорости распространения звука (известных

или прогнозируемых) вдоль акустических трасс. Для этого необходимо выявить региональные особенности распространения звука в придонном звуковом канале на шельфе, в подводном звуковом канале (ПЗК) глубокого моря в теплый период года и приповерхностном звуковом канале (ППЗК), формируемом в зимний сезон.

Одним из основных фундаментальных научных результатов, определяющих методику расчета эффективной скорости звука на акустических трассах, является открытие акустического «оползня» (фокусировка акустической энергии в придонном слое на шельфе, переход ее на ось ПЗК в глубоком море и распространение с минимальным затуханием на

большие расстояния). Это явление было зафиксировано американскими специалистами [1] вблизи Гавайских островов и затем подтверждено в работе [2] для гидрологических условий Японского моря.

В Охотском море ПЗК формируется вблизи ядра холодного подповерхностного слоя (ХПС), положение которого в теплый период года на глубоководной акватории Охотского моря, как правило, не выходит за пределы горизонтов 75–100 м. В прибрежных районах моря ХПС выделяется как придонный слой, а положение его ядра здесь зависит от глубин на подходах к берегу.

Режимные особенности ХПС Охотского моря (пространственная изменчивость глубины залегания его ядра, температуры воды в нем, а также особенности межгодовых изменений) основывались на гипотезе, согласно которой аномалии температуры воды формируются в основном в осенне-зимнее время [3–9]. При этом, как правило, авторы исходили из предположения о противодействии и межгодовых вариациях двух основных термодинамических процессов осенне-зимнего периода: адвекции сравнительно теплых тихоокеанских вод в море и выхолаживающего эффекта осенне-зимней конвекции.

Цель настоящей работы состоит в оценке влияния сезонной и межгодовой изменчивости гидрологических и акустических параметров в подповерхностных водах Охотского моря на точность расчета эффективной скорости звука на акустических трассах. В качестве объектов исследований определены режимные особенности формирования полей скорости звука в Охотском море, методические подходы по подготовке и обработке многолетних массивов океанологических данных, а также правила группировки и обработки исходных данных на акустических трассах.

■ Используемые массивы океанологических данных

Для подготовки массива океанологических данных Охотского моря были использованы все доступные данные глубоководных наблюдений (батометрические серии, STD-наблюдения, данные дрейфующих буев (Profiling Autonomous Lagrangian Circulation Explorer – PALACE), батитермографные (МВТ) наблюдения и данные отрывных зондов (ХВТ)). Два последних вида наблюдений дают только профили температуры воды. В представленных наборах данных присутствуют станции с батометрическими наблюдениями (с разреженной дискретностью по вертикали, которая равна или близка к стандартным горизонтам), а также батитермографные,

ХВТ, STD-наблюдения и данные дрейфующих буев, у которых более высокое разрешение измеряемых параметров по вертикали. Источники данных – мореведческие организации России (ВНИИГМИ–МЦД, ДВНИГМИ, ГС ТОФ, ТИНРО-Центр, ТОИ ДВО РАН), США (NODC-NOAA) и Японии (JODC).

В первую очередь была проведена процедура исключения дублей станций, что неизбежно при обобщении массового материала наблюдений, взятого из различных источников. Затем отбраковывались недостоверные значения характеристик с применением статистических методов и региональных особенностей исследуемой акватории.

После исключения дублирующих станций и недостоверной информации в результирующем океанографическом массиве Охотского моря осталось 129 846 станций, выполненных с 1929 по 2020 г. Однако станций с одновременным определением температуры и солёности, что необходимо для расчета скорости звука в морской воде, оказалось несколько меньше – 101 618. Следует отметить, что в зимнее время на акватории Охотского моря выполнено сравнительно небольшое число наблюдений (как правило, на акватории западнее и севернее островов Курильской гряды). Это связано с наличием льда на большей части моря, а также с суровыми метеорологическими условиями (низкая температура воздуха, большие скорости ветра и обледенение). Недостаточно данных также до 1950 года.

На всех станциях выполнена интерполяция параметров на горизонты, кратные 5 метрам, а затем на каждой океанологической станции была рассчитана скорость звука и определен горизонт ПЗК (горизонт с минимальной скоростью звука на станции). Затем на этом горизонте были выбраны значения температуры, солёности и скорости звука.

■ Методология расчета эффективной скорости звука в ПЗК на трассах

В настоящей работе реализован (в виде программ для операционных систем семейств «Windows» и «Linux») следующий алгоритм расчета эффективной скорости звука на конкретных трассах, который включает в себя следующие этапы вычислений.

1. Формируется (или выбирается из существующих) специализированный массив океанологических данных с параметрами ПЗК, на основании которого будут проводиться вычисления. Отметим, что в процессе вычислений одновременно можно использовать как один, так и несколько наборов данных.

2. Вводятся начальные параметры конкретной трассы (координаты излучателей и приемников акустических сигналов, расстояние между узлами трассы, размеры областей «захвата» исходных данных и период выбора данных).

3. Проводится предварительное осреднение исходных данных по дате и относительному местоположению станций в пределах областей, относящихся к конкретному узлу обобщения данных (для минимизации вклада данных микрополигонов и многосерийных станций). Для этого группируются станции, расположенные рядом и выполненные в одни календарные сутки.

4. В каждом узле конкретной трассы производится осреднение рассчитанных на предыдущем этапе суточных значений и данных единичных станций. Расчет средних значений в узлах трассы выполняется выбранным методом осреднения по всем станциям, попадающим в область осреднения узла трассы (возможен расчет среднего арифметического или медианного значения).

5. На заключительном этапе определяется эффективная скорость звука между излучателем и приемником сигнала (как среднее взвешенное значение, учитывающее расстояние между узлами и средние значения в узлах трассы).

■ Первое приближение методики расчета эффективной скорости звука с использованием только многолетних массивов океанологических данных

Этот вариант применяется в случаях, когда имеется ограниченный массив исходных данных. К настоящему времени существует большое количество информационных ресурсов для формирования океанологических глубоководных массивов данных. Однако они, как правило, не всегда достаточны для исследования параметров ПЗК не только в холодный, но и в теплый периоды года. Все это не позволяет более полно исследовать пространственно-временные особенности распределения параметров ПЗК на уровне, необходимом для более точного расчета эффективных скоростей звука на акустических навигационных трассах.

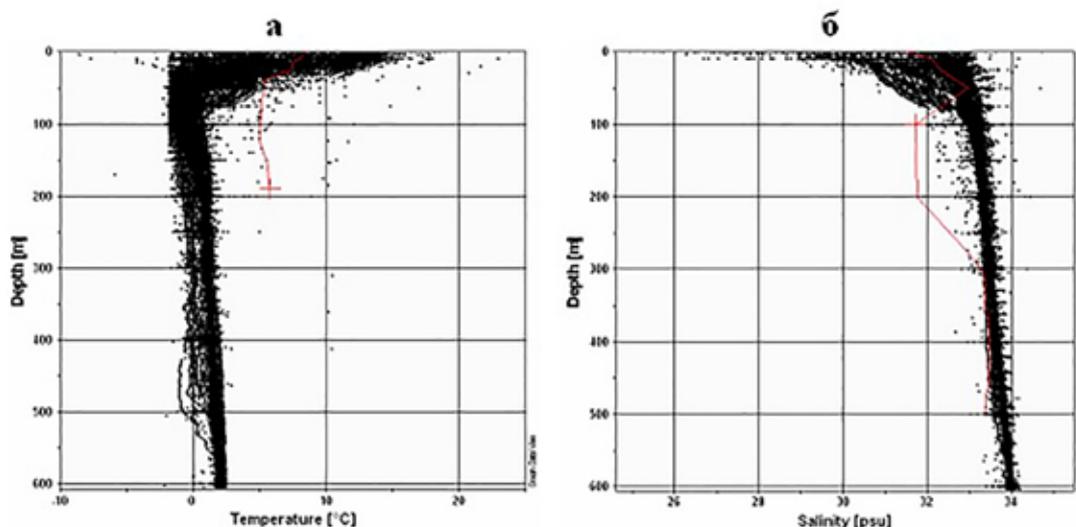
Предлагаемый вариант расчета эффективной скорости звука на трассах может быть использован также в случаях, когда имеются только общие представления о вертикальном распределении температуры воды и скорости звука на исследуемой акватории. Более того, недостаточно исследована изменчивость характеристик вод различных масшта-

бов (от короткопериодной до межгодовой), не проработан в должной мере вопрос о горизонтах среднего многолетнего положения ПЗК в отдельных регионах исследуемой акватории и временной изменчивости его параметров (глубины положения, температуры и солёности морской воды, а также скорости звука в ядре ПЗК).

Отметим, что в данном варианте расчета эффективной скорости звука на трассах предполагается достаточно высокое качество исходной океанологической информации. Практика использования океанологических данных показывает, что во всех мировых центрах данных имеется много станций с недостоверной информацией, как на отдельных горизонтах наблюдений, так и в пределах всего профиля конкретной станции (даже если на станции по конкретному элементу наблюдений стоит флаг «хорошее значение»). Это связано с тем, что в центрах сбора информации, как правило, проводится оценка данных только по физическим пределам конкретных элементов наблюдений. Например, для температуры воды (основной параметр, влияющий на скорость звука) диапазон изменений при присвоении флага «хорошее значение» составляет от -2 до $+40$ °С (причем вне зависимости от горизонта наблюдений). Таким образом, если предварительно не была проведена «чистка» исходных данных на конкретных станциях, то в условиях ограниченного набора информации при расчетах можно получить существенные погрешности эффективной скорости звука на трассах, так как изменение температуры воды на 1 °С приводит к изменению скорости звука примерно на 4 м/с. В качестве примера на рис. 1 приведены данные по температуре и солёности, заимствованные для ограниченного района Охотского моря (49 – 54 ° с.ш.; 144 – 150 ° в.д.) с электронного ресурса [10].

Следующее необходимое требование к массивам исходной океанологической информации – это удаление из них мелководных станций. Источники навигационных сигналов (как стационарные, так и находящиеся на заякоренных судах) в нашем случае располагаются на придонных горизонтах, где глубина места их постановки не превышает 30 – 50 м. Вертикальное распределение температуры воды (и скорости звука) в Охотском море свидетельствует о наличии в весенне-летний период года прогретого (с высокими значениями скорости звука) верхнего квазиоднородного слоя. Его вертикальная протяженность в основном не превышает 10 – 20 м. Под этим слоем располагается слой сезонного термоклина, где наблюдается резкое падение температуры воды и скорости звука (с минимумом на придонных гори-

Рис. 1. Вертикальное распределение температуры воды (а) и солёности (б) в локальном районе Охотского моря



зонтах). Поэтому при подготовке исходного массива данных и исключения влияния мелководных станций при расчетах эффективной скорости звука в ПЗК на трассах исследуемой акватории необходимо удалить из исходного массива данные океанологических станций на локальных акваториях с глубинами менее 30 м.

Опыт работы с океанологическими данными в Охотском и Японском морях свидетельствует о том, что поиск минимальных значений скорости звука на станциях конкретных массивов данных и, следовательно, глубины залегания ПЗК необходимо производить разными алгоритмами для станций в глубоком море и на шельфе. Для этого исследуемая акватория должна быть разделена на две части: мелководную (с глубинами менее 100 м) и глубоководную. Соответствующий алгоритм для поиска параметров ПЗК выбирается с помощью обращения программы к предварительно подготовленным координатам границ шельфа выбранного полигона. Главное отличие алгоритмов заключается в том, что минимальное значение на последнем горизонте станции в глубоком море не учитывается, в отличие от шельфа.

Затем на конкретных станциях выполняется поиск горизонтов, на которых скорость звука равна минимальному значению. Несколько подряд идущих горизонтов с минимальным значением скорости звука заменяются одним горизонтом (с осреднением глубины положения ПЗК). Для найденного горизонта с минимальным значением скорости звука на станции определяется его положение в списке горизонтов. Если он последний в списке и станция находится в глубоком море, он игнорируется и не сохраняется. Если он последний в списке и станция находится на шельфе, он сохраняется в файл результатов. Если в

глубоком море он предпоследний в списке, а расстояние между ним и последним горизонтом больше заданного предела для этой глубины, он игнорируется и не сохраняется. Сформированный таким образом специализированный массив станций с параметрами ПЗК исследуемой акватории используется затем при расчетах эффективной скорости звука на акустических трассах. На каждой станции данного массива обязательно должна быть следующая информация: дата, время, координаты, глубина положения ПЗК, а также значения температуры, солёности и скорости звука в нем.

Практические расчеты в Охотском и Японском морях свидетельствуют о том, что временной масштаб обобщения исходной информации при расчете эффективных значений скорости звука на трассах должен быть не менее 1 месяца (± 15 суток от даты, на которую дается гидрологический прогноз). Диаметр области «захвата» данных (при расчете средних значений в каждом расчетном узле глубоководного участка трассы) должен быть не менее 110 км в Охотском море и 55 км в Японском море. Предлагаемые размеры для областей осреднения информации, во-первых, связаны с пространственно-временной неоднородностью исходной информации (чтобы не было пропусков данных в отдельных узлах трассы). Во-вторых, эти довольно крупные области осреднения позволяют сгладить отдельные «выбросы» в исходных данных, которые, как правило, связаны с недостаточной «чисткой» исходной информации, а также с наличием разномасштабной изменчивости (от короткопериодной до межгодовой). Поэтому при ограниченном наборе данных на результат расчета средних значений в каждом узле трассы возможно существенное влияние как погрешностей измерений,

так и вклада аномальных значений параметров, связанных с разномасштабной изменчивостью.

В Охотском море на шельфовых (мелководных) участках трасс, протяженностью 50–60 км от источников акустических сигналов, 5–7 областей «захвата» данных должны быть в форме эллипсов с горизонтальными размерами осей от 30×15 до 50×25 км (с постепенным их увеличением в направлении к приемнику сигналов). Причем большая ось эллипсов должна располагаться параллельно или по касательной к изобатам на этом участке шельфа. Такие формы и размеры областей «захвата» данных необходимы для уменьшения влияния на результаты расчетов прибрежных мелководных станций, на которых скорость звука на придонных горизонтах существенно выше, чем в ПЗК на остальной части трассы. Аналогичные формы областей «захвата» данных и ориентацию их больших осей относительно изобат необходимо также применять для трасс с направлением вдоль или по касательным к изобатам на мелководных участках исследуемых акваторий.

■ Уточнение методики расчета эффективной скорости звука на основе многолетних массивов океанологических данных и межгодовой изменчивости параметров ПЗК

В настоящем разделе представлена методика для исследования межгодовой изменчивости параметров

ПЗК на исследуемой акватории (с предсказанием наиболее вероятных сценариев формирования термических и акустических условий на конкретных полигонах), а также подготовки соответствующих массивов данных для расчетов эффективной скорости звука конкретных трасс Охотского моря.

Ранее в работах [4, 11] была рассмотрена межгодовая изменчивость температуры воды в ХПС Охотского моря, и в рамках предложенной классификации была проведена типизация лет на «теплые», «нормальные» и «холодные». Критерием для «нормальных» лет был принят следующий диапазон значений температуры: среднее значение ряда $\pm 0.674\delta$, где δ – стандартное отклонение ряда. Годы, которые выходили за пределы «нормы», относились соответственно к «теплым» или «холодным».

На основе выполненной типизации были сформированы три массива океанологических данных – «холодных», «теплых» и «нормальных» лет. Затем, основываясь на сформированных массивах только «холодных» и «теплых» лет, были представлены особенности средних многолетних месячных пространственных распределений температуры воды Охотского моря на горизонте 100 м, который отражает особенности распределения температуры воды вблизи ядра ПЗК (рис. 2). Анализ пространственных распределений температуры, представленных на этом рисунке, показал, что при различных типах режима достаточно четко различаются размеры обла-

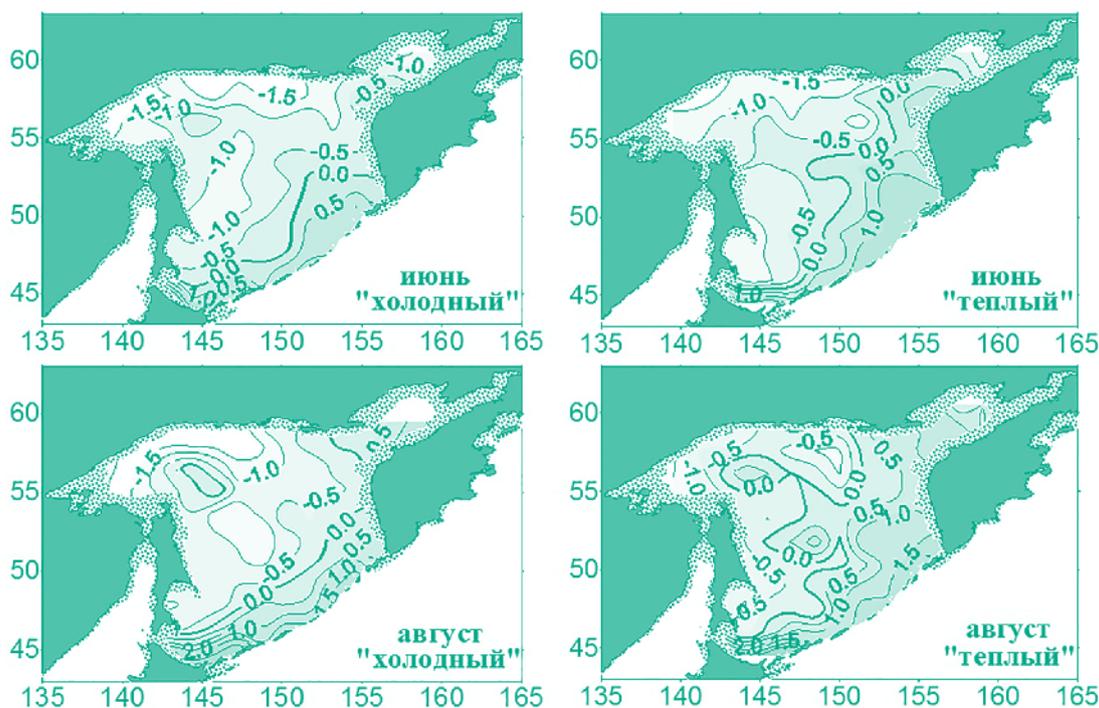


Рис. 2. Средние многолетние типовые распределения температуры воды (°C) на горизонте 100 метров в Охотском море

стей, которые заполнены водными массами с температурой ниже 0 °С. Разность значений температуры в отдельных частях моря (между «холодными» и «теплыми» типовыми гидрологическими состояниями) на горизонте 100 м достигает 0.5–1.0 °С.

Новые результаты исследования межгодовой изменчивости температуры воды в ХПС основываются на существенно дополненном массиве океанологических данных, включающем 129 846 станций, за период с 1929 по 2020 г. Анализ базы данных показал, что океанологических станций, выполненных в холодный период года в Охотском море, очень мало. На основе этой информации невозможно дать оценку межгодовой изменчивости термического состояния вод всего моря в холодный период года (период максимального охлаждения верхнего слоя вод и максимального развития зимней конвекции). Особенно это актуально для обширного шельфа, который в зимний период покрыт льдом. Из предшествующих работ известно [4, 7, 11, 12], что особенности распределения температуры воды на подповерхностных горизонтах, сформированные в зимний период, сохраняются длительное время (по июль–август). Хорошо выраженный слой сезонного термоклина препятствует поступлению тепла от поверхности моря на подповерхностные горизонты. Поэтому термический режим ХПС зависит в основном от метеорологических условий предшествующей зимы, особенностей динамики вод в пределах моря и адвекции тепла течениями. Сезонный прогрев поверхностных вод в весенне-летний период, как правило, не распространяется глубже 20–30 м. Поэтому данные океанологических наблюдений за период с марта по август в подповерхностном слое вод можно использовать для исследования межгодовой изменчивости термического состояния ХПС Охотского моря.

Для оценки межгодовых изменений термического состояния вод ХПС Охотского моря использованы аномалии температуры воды за март–август в трапециях размером 2×2 градуса. Отметим, что в настоящее время на исследуемой акватории нет даже сравнительно небольших областей, для которых имелся бы непрерывный пакет информации за последние 50–70 лет. Поэтому восстановление пропусков в массивах аномалий температуры воды выполнено процедурой, изложенной ранее в [4, 11]. После выполнения всех этапов восстановления пропущенных значений выполнялось разложение средних за март–август аномалий температуры воды ХПС по естественным

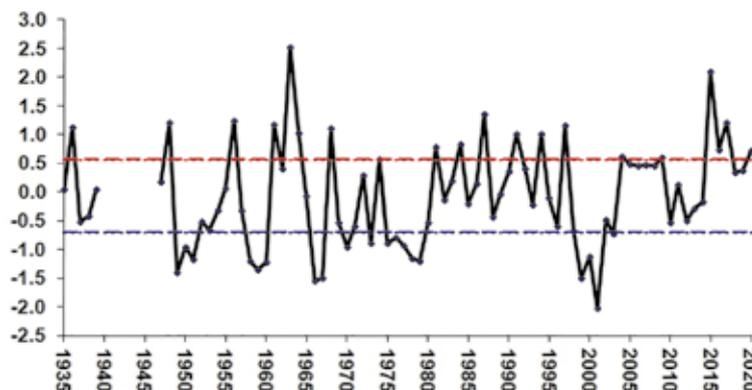


Рис. 3. Межгодовая изменчивость термического состояния вод ХПС Охотского моря (красные и синие пунктирные линии ограничивают диапазон «нормальных» лет)

ортогональным функциям (ЕОФ). Анализ межгодовой изменчивости термического состояния вод ХПС проведен по данным вклада только первой компоненты разложения по ЕОФ (рис. 3), вклад которой отражает синхронные колебания в пределах Охотского моря. Типизация лет на «теплые», «нормальные» и «холодные» выполнялась по данным временного ряда, приведенного на рис. 3. Было получено, что «нормальные» годы находятся в диапазоне значений аномалий температуры воды в ХПС от -0.70 до +0.57°С. Годы, которые выходили за пределы «нормы», относились соответственно к «теплым» или «холодным».

Результаты, полученные по существенно дополненному массиву многолетних океанологических наблюдений с 1935 по 2020 г., свидетельствуют о том, что в Охотском море на глубинах локализации оси ПЗК термические условия год от года могут измениться существенно. Предполагается также, что и поля параметров ПЗК в Охотском море могут в конкретный год значительно меняться. В связи с этим были построены средние многолетние месячные поля скорости звука в ПЗК отдельно по массивам «холодных» и «теплых» лет (рис. 4). Представленные на рис. 4 поля скорости звука свидетельствуют о том, что в «холодные» по термическим условиям годы на акватории от берегов Сахалина до меридиана 150° в.д. значения скорости звука в ПЗК находятся в пределах 1440–1444 м/с. В то время как в «теплые» по термическим условиям годы они возрастают до 1444–1448 м/с.

Основываясь на результатах, представленных на рис. 4 и сформированных массивах данных для «холодных», «нормальных» и «теплых» лет, были проведены расчеты эффективной скорости звука в ПЗК на предполагаемых трассах полигона в Охот-

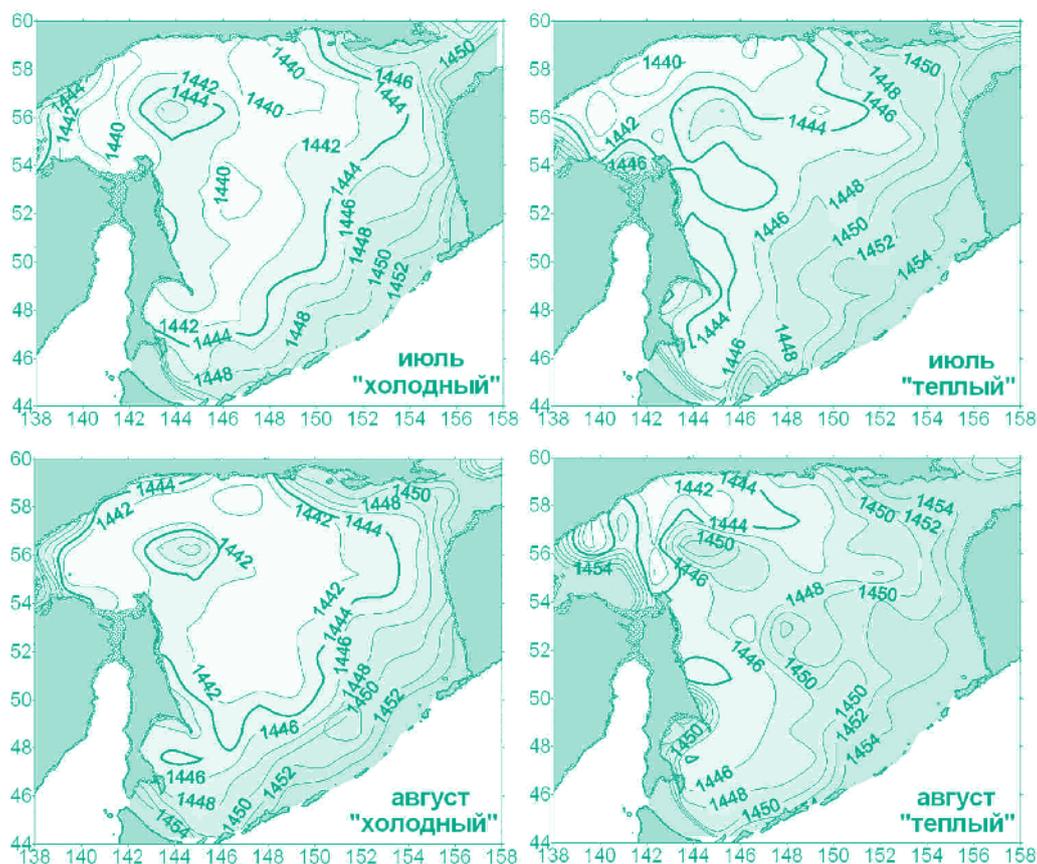


Рис. 4. Средние многолетние типовые распределения скорости звука (м/с) в ПЗК на акватории Охотского моря, построенные по массивам «холодных» и «теплых» лет

ском море (ограниченном параллелями мысов Елизаветы и Терпения). Начальные точки трасс (пункты излучения акустических сигналов) находились вблизи мыса Терпения (48.64695 с.ш.; 144.8289 в.д.) и у мыса Елизаветы (54.41242 с.ш.; 142.8209 в.д.). Приемники сигналов находились в глубоководной части моря с удалением от излучателей примерно на 300 км (51.69053 с.ш.; 145.3149 в.д.) и 500 км (52.1759 с.ш.; 149.3958 в.д.). Результаты расчетов представлены в табл. 1, из которой следует, что в разные по термическим условиям годы эффективная скорость звука на трассах в Охотском море может различаться существенно (в «теплые» и «холодные» годы на трассах 300 и 500 км до 2.2 и 5.4 м/с соответственно).

Представленные в табл. 1 результаты свидетельствуют о возможности существенного улучшения прогноза эффективной скорости звука на трассах по гидрологическим данным при использовании в расчетах типовых массивов данных. Однако в реальной практике экспедиционных экспериментов и выполнения специальных миссий на конкретных полигонах, как правило, отсутствует оперативная глубоководная океанологическая информация, которая бы помогла оценить тип сформировавшихся гидрологических условий конкретного года.

В связи с этим реализована задача разработки прогноза типа термического режима на горизонтах локализации ПЗК в Охотском море. Для этого были сформированы ряды предикторов, возможно, влияю-

Таблица 1. Эффективная скорость звука в ПЗК на трассах в Охотском море при использовании многолетних массивов океанологических данных с 20 июля по 20 августа

Тип термического состояния вод Охотского моря	Эффективная скорость звука в ПЗК на трассах			
	м. Терпения – 300 км	м. Терпения – 500 км	м. Елизаветы – 300 км	м. Елизаветы – 500 км
Средний многолетний (все данные)	1443.494	1443.556	1444.96	1443.954
Многолетний «нормальный»	1443.285	1443.287	1445.908	1444.138
Многолетний «холодный»	1442.926	1440.923	1442.831	1441.467
Многолетний «теплый»	1444.349	1446.226	1445.04	1446.907

щих на изменения термического режима Охотского моря. Также проведен корреляционный анализ этих рядов с параметром, характеризующим временные вариации термического режима Охотского моря, представленным на рис. 3.

Значимые корреляционные связи были получены между параметром, характеризующим термическое состояние вод ХПС Охотского моря, и West Pacific teleconnection index (WP), а также локальными индексами, характеризующими состояние прилегающих районов суши и деятельного слоя прилегающих акваторий Японского моря и северо-западной части Тихого океана [13]. К ним относятся зимняя температура воздуха на метеорологических станциях Аян, Охотск и Магадан, а также 7 массивов средних месячных зимних значений температуры воздуха над прилегающими к Охотскому морю районами Азиатского материка с различными пространственными масштабами осреднения данных. Также значимые корреляционные связи получены для пяти локальных регионов, характеризующих зимние средние месячные значения температуры поверхности океана. Один из них расположен западнее пролива Лаперуза и характеризует межгодовую изменчивость термического состояния вод Японского моря, поступающих в южную часть Охотского моря. Четыре региона располагаются восточнее центральных и северных проливов Курильской гряды и отражают межгодовую изменчивость тихоокеанских вод, поступающих в Охотское море. Также значимые корреляционные связи получены с межгодовой изменчивостью протяженности лучей (их схема приведена в работе В.В. Плотнокова [14]). Данные о кромке ледяного покрова получены с ресурса [15].

На основе полученных данных корреляционного анализа был сформирован массив возможных предикторов для составления уравнения прогноза полей параметров ПЗК в Охотском море. При формировании уравнения прогноза типа («холодный», «нормальный», «теплый») все ряды возможных предикторов были обработаны методом пошагового регрессионного анализа. В результате было получено прогностическое уравнение (обучаемая выборка которого получена по данным за период с 1961 по 2015 г.), характеризующее гидрологическое состояние ХПС Охотского моря в теплый период года. Данное уравнение имеет следующий вид:

$$Atw = -0.003 \cdot L_6 + 0.826 \cdot P_1 + 0.102 \cdot P_2 + 0.018 \cdot P_3 + 0.002 \cdot L_{12} - 0.25 \cdot WP + 0.64 \cdot P_4 + 0.189 \cdot P_5 + 3.829$$

где Atw – аномалия температуры воды ХПС Охотского моря; L_6 – средняя протяженность луча № 6

(с последней декады февраля по последнюю декаду марта); P_1 – средняя температура воды в марте для четырех районов, расположенных к востоку от центральных и северных проливов Курильской гряды; P_2 – средняя за декабрь–февраль температура воздуха в регионе севернее ГМС Аян; P_3 – средняя за январь–март температура воздуха в районе 60–70° с.ш. и 140–160° в.д.; L_{12} – средняя протяженность луча № 12 (с последней декады февраля по последнюю декаду марта); WP – среднее значение индекса WP (West Pacific teleconnection index) за январь–март; P_4 – средняя температура воздуха в районе Сибирского максимума за январь–март; P_5 – средняя за январь–февраль температура воды на поверхности в районе к западу от пролива Лаперуза (схема расположения предикторов представлена на рис. 5).

Проведенные расчеты по представленному уравнению на независимом периоде (2016–2020 г.) показали, что все прогнозы оправдались. Полученные результаты временных изменений термических условий, а также результаты прогнозирования свидетельствуют о применимости предложенного прогностического уравнения для предсказания возможного сценария формирования термического режима в подповерхностных водах Охотского моря в весенне-летний период.

В связи с этим предлагаются следующие этапы для расчета эффективной скорости звука на акустических трассах в ПЗК Охотского моря по уточненной методике:

- подготавливаются входные параметры для прогностического уравнения, по результатам которого и предложенным пределам аномалий температуры воды в ХПС для «нормальных лет» (от -0.70 до +0.57°C) определяется тип развития термических условий в ПЗК Охотского моря («холодный», «нормальный» или «теплый»);
- для расчетов выбирается соответствующий тип океанологического массива с использованием имеющейся дополнительной информации (с соответствующей «чистой» исходной информацией);

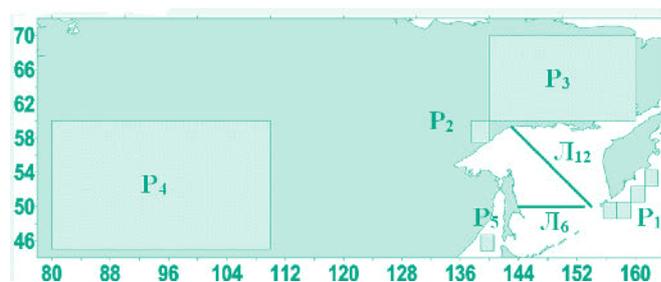


Рис. 5 Схема расположения регионов для расчета предикторов прогностического уравнения

– на заключительном этапе производится расчет эффективной скорости звука на выбранных трассах локального региона Охотского моря.

Отметим также, что при проведении расчетов необходимы все технологические процедуры, изложенные в предшествующем разделе настоящей работы.

■ Уточнение методики расчета эффективной скорости звука на основе многолетних массивов океанологических данных, а также межгодовой и сезонной изменчивости параметров ПЗК

Представленная выше уточнённая методика расчета эффективной скорости звука на акустических трассах так же имеет недостатки, которые связаны с пространственно-временной неоднородностью имеющегося массива данных и с недостаточным учетом межгодовой и сезонной изменчивости гидрологических и акустических параметров. Даже в пределах одного типового массива присутствует информация, существенно отличная (в ту или иную сторону) от средних многолетних значений. Более того, временной промежуток обобщения информации (месяц) также сравнительно велик. Это не исключает случаев преобладания (при формировании наборов данных конкретных трасс) информации, полученной на начало либо на конец периода обобщения информации. К дополнительным факторам, также вносящим погрешности в рассчитываемые параметры конкретного года, можно отнести наличие теплых либо холодных вихревых образований разного масштаба. Перечисленные недостатки существующих на настоящее время массивов океанологических данных приводят к определенным погрешностям при расчете эффективной скорости звука на конкретных трассах. Все это настоятельно требует проведения контрольных океанологических и акустических наблюдений непосредственно перед началом экспедиционных экспериментов или специализированных миссий.

Для учета межгодовой и сезонной изменчивости параметров ПЗК (в расчетах эффективной скорости звука на акустических трассах в Охотском море) предлагается следующий сценарий, включающий несколько этапов подготовительных работ.

1. Вначале проводятся все действия, предлагаемые в предшествующих методических разработках по выбору и подготовке соответствующего массива данных (по результатам расчетов по прогностическому уравнению).

2. Перед началом проведения эксперимента в ключевых районах полигона (в точках излучения и

приема акустических сигналов, а также вблизи границы шельфа каждой трассы) выполняются гидрологические наблюдения. Вертикальное распределение параметров (температуры воды и скорости звука) сравнивается со средними многолетними профилями, рассчитанными по выбранному массиву данных. По результатам сравнения делается заключение о совпадении или различии параметров термического режима конкретного года (по отношению к средним многолетним данным). Следует подчеркнуть, что конкретные наблюдения только в исключительных случаях могут совпасть со средними многолетними данными. Как правило, они могут только свидетельствовать о более теплом либо холодном режиме конкретного года.

3. Далее учитываются следующие результаты исследований. Выполненный ранее анализ средних многолетних месячных полей показал, что в теплый период года (с мая–июня по август–сентябрь) на акватории Охотского моря, как правило, наблюдается рост скорости звука в ПЗК. Эту закономерность подтверждают также графики, приведенные на рис. 6 с использованием всей имеющейся океанологической информации. На представленных на рис. 6 трассах излучатели находятся у мысов Елизаветы и Терпения, а приемники расположены на удалении от них на 300 и 500 км. Все эти трассы располагаются в пределах ядра холода, находящегося в глубоководной части моря восточнее Сахалина [8]. На рис. 6 по горизонтальной оси представлено время опережения/запаздывания (в днях) относительно условной

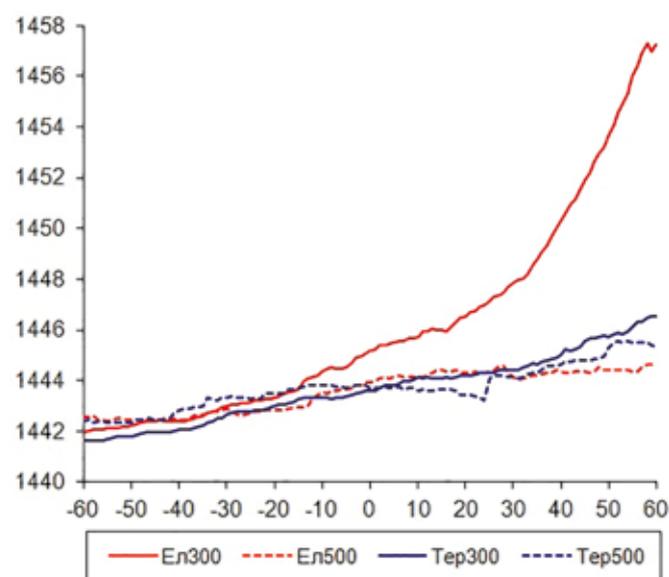


Рис. 6. Изменения эффективной скорости звука на трассах в Охотском море с различными смещениями (в днях) от даты эксперимента

даты проведения экспериментальных работ (5 августа). Представленные графики свидетельствуют, что эффективная скорость звука в ПЗК Охотского моря в течение теплого периода, как правило, имеет тенденцию роста.

Таким образом, выполнив ряд расчетов (со смещением с определенной дискретностью относительно известной даты проведения эксперимента), мы получим для каждой трассы массив сравнительно пониженных или повышенных значений эффективной скорости звука. В табл. 2 представлены рассчитанные значения эффективной скорости звука на трассе м. Елизаветы – 300 км с использованием всей имеющейся океанологической информации.

На заключительном этапе нужно будет сравнить полученные гидролого-акустические наблюдения конкретного года с результатами расчетов с разными смещениями. Минимальная погрешность между оперативными гидролого-акустическими наблюдениями и разными вариантами расчетов по исторической базе данных позволит использовать наиболее близкие к реальным значения эффективной скорости звука на трассах.

В этом случае в памяти компьютера подводного объекта (помимо внесения неизменных данных, например, координаты точек излучения сигналов, параметры трасс и т.д.) включается команда использования массива данных соответствующего типа («нормальный», «холодный» или «теплый»), а также основанное на конкретных наблюдениях текущего года временное смещение относительно текущей даты.

Если полигон работы подводного объекта большой и будут проводиться даже единичные корректировочные океанологические измерения, то корректировку расчетов эффективной скорости звука на акустических трассах, выполняемых автономным подводным объектом, можно будет производить одной командой смены временного смещения относительно текущей даты.

Проведено сравнение значений эффективной скорости звука, полученных по гидрологическим и акустическим данным, на трассах в южной части Охотского моря. Начальная точка трасс (пункты излучения акустических сигналов) находилась вблизи мыса Терпения (49.20797 с.ш. и 144.4321 в.д.). Приемники сигналов находились в глубоководной части моря с удалением от излучателей примерно на 300 км (47.4746 с.ш. и 147.463 в.д.) и 500 км (47.18762 с.ш. и 150.3922 в.д.).

Выполненное сравнение показало, что значения эффективной скорости звука на представленных трассах, полученные по всем имеющимся на настоящее время гидрологическим данным и в рамках первого приближения предлагаемой методики, отличались от акустических данных на 1.2-1.4 м/с. С учетом времени распространения акустического сигнала от излучателя до приемника (на трассах протяженностью до 500 км) средняя невязка определения дистанции составляет около 440 м.

В то же время использование соответствующих на конкретный год массивов многолетних океанологических данных и предлагаемой методики с учетом межгодовой и сезонной изменчивости параметров

Таблица 2. Эффективная скорость звука (м/с) на трассе м. Елизаветы – 300 км с различными сдвигами (в днях) относительно 5 августа

Излучатель	Приемник	Дата	Сдвиг	Все данные
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	06/06/2021	-60	1441.705
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	06/16/2021	-50	1442.136
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	06/26/2021	-40	1442.276
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	07/06/2021	-30	1442.454
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	07/16/2021	-20	1443.077
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	07/26/2021	-10	1443.618
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	08/05/2021	0	1444.960
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	08/15/2021	10	1445.706
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	08/25/2021	20	1445.870
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	09/04/2021	30	1446.857
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	09/14/2021	40	1447.594
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	09/24/2021	50	1451.334
54.41242;142.8208683	51.69053167;145.31489	10/04/2021	60	1454.713

ПЗК снижает погрешности расчета эффективных скоростей звука на трассах в южной части Охотского моря до 0.05–0.15 м/с. В этом случае средняя невязка определения дистанции не превышает 100 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы пространственные особенности распределения, а также сезонная и межгодовая изменчивость гидрологических и акустических параметров в подповерхностном слое вод Охотского моря. Выявлены закономерности (с использованием всех доступных данных глубоководных океанологических наблюдений за 1929–2020 г., а также опорных гидроакустических сигналов), позволившие представить уточненную методику расчета эффективной скорости звука на акустических трассах в Охотском море. Методика формирования и обработки многолетних массивов океанологических данных, а также правила группировки и обработки исходных данных позволяют существенно уменьшить погрешность

расчетов эффективной скорости звука на акустических трассах по данным океанологических наблюдений. Предполагается, что использование исторической океанологической информации будет наиболее востребовано в бортовом компьютере автономного подводного объекта, выполняющего миссию на сравнительно обширном полигоне с существенно изменяющимися гидрологическими условиями и значениями эффективной скорости звука в ПЗК на акустических трассах.

Работа выполнена по госбюджетной тематике ТОИ ДВО РАН: «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем» (регистрационный номер: ААА-А-А20-120031890011-8) и «Исследование основных процессов, определяющих состояние и изменчивость океанологических характеристик окраинных морей Азии и прилегающих районов Тихого и Индийского океанов» (регистрационный номер: 121021700346-7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Tappert F.D., Spiesberger J.L., Wolfson M.A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2002. Vol. 111, No. 2. P. 757.
2. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Дубина В.А., Лучин В.А. Методология применения океанологических данных для высокоточной обсервации подводных объектов на большой дальности // *Подводные исследования и робототехника*. 2018. № 2 (26). С. 49–54.
3. Жигалов И.А., Лучин В.А. Межгодовая изменчивость температуры придонных вод на шельфе западной Камчатки // *Метеорол. и гидрол.* 2005. № 10. С. 72–80.
4. Лучин В.А., Жигалов И.А. Межгодовые изменения типовых распределений температуры воды в деятельном слое Охотского моря и возможность их прогноза // *Изв. ТИНРО*. 2006. Т. 147. С. 183–204.
5. Kitani K. An oceanographic study of the Okhotsk Sea-particularly in regard to cold waters // *Bull. Far Seas Fish. Res. Lab.* 1973. Vol. 9. P. 45–77.
6. Фигуркин А.Л. Развитие океанологических условий западной Камчатки по данным мониторинговых наблюдений 1997 и 2000 гг. // *Изв. ТИНРО*. 2002. Т. 130. С. 103–116.
7. Фигуркин А.Л. Изменчивость термохалинного состояния придонных вод северной части Охотского моря // *Изв. ТИНРО*. 2011. Т. 166. С. 255–274.
8. Чернявский В.И. Изменчивость ядра холода и прогноз типа термического режима на севере Охотского моря // *Океанологические основы биологической продуктивности северо-западной части Тихого океана*. Владивосток, 1992. С. 104–113.
9. Luchin V.A., Zhigalov I.A., Plotnikov V.V. The Interannual Variability of the Water Temperature of the Okhotsk Sea // *PICES Sci. Rep.* 2004. No. 27. P. 27–29.
10. World Ocean Database Select And Search [Электронный ресурс] // NOAA National Centers For Environmental Information: [сайт]. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/dbsearch.html> (дата обращения: 10.04.2021)
11. Лучин В.А., Матвеев В.И. Межгодовая изменчивость термического состояния холодного подповерхностного слоя Охотского моря // *Изв. ТИНРО*. 2016. Т. 187. С. 205–216.
12. Морошкин К.В. Водные массы Охотского моря : моногр. М. : Наука, 1966. 70 с.
13. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time-Series [Электронный ресурс] // NOAA Physical Sciences Laboratory: [сайт]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/> (дата обращения: 10.04.2021).
14. Плотноков В.В. Изменчивость ледовых условий дальневосточных морей России и их прогноз. Владивосток: Дальнаука, 2002. 172 с.
15. NASA Worldview: [сайт]. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 10.04.2021)

Для цитирования:

Лучин В.А., Голов А.А., Шешегов А.В., Дубина В.А., Моргунов Ю.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАССИВОВ МНОГОЛЕТНИХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ОПОРНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ СКОРОСТИ ЗВУКА НА АКУСТИЧЕСКИХ ТРАССАХ В ОХОТСКОМ МОРЕ // *Подводные исследования и робототехника*. 2021. №. 2(36). С. 4–17. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_01.

Об авторах

ЛУЧИН Владимир Александрович, д.г.н., ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Научные интересы: океанографические массивы данных, пространственно-временная изменчивость океанографических параметров

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Тел.: +7 (423) 231-26-29

E-mail: vluchin@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0003-4136-302X

ГОЛОВ Александр Александрович, к.т.н., старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Научные интересы: акустическая томография, гидроакустика, звукоподводная связь, подводная навигация

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Тел.: +7 (423) 231-14-00

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

ORCID ID: 0000-0002-7160-0076

ШЕШЕГОВ Андрей Викторович, программист

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Тел.: +7(423)231-26-29

E-mail: tt6b24@mail.ru

ДУБИНА Вячеслав Анатольевич, к.г.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Научные интересы: спутниковая океанология, спутниковая метеорология

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Тел.: +7 (904) 627-12-14

E-mail: dubina@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0003-3273-8977

МОРГУНОВ Юрий Николаевич, д.т.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Научные интересы: Акустика океана, акустическая навигация, акустическая дальнометрия, звукоподводная связь, акустическая томография

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Тел.: +7 (423) 231-16-31

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0002-1961-1915



APPLICATION OF LONG-TERM ARRAYS OF OCEANOLOGICAL DATA AND REFERENCE HYDROACOUSTIC SIGNALS FOR REFINING THE METHOD OF CALCULATING THE EFFECTIVE SOUND SPEED ON ACOUSTIC PATHS IN THE SEA OF OKHOTSK

V.A. Luchin, A.A. Golov, A.V. Sheshegov, V.A. Dubina, Yu.N. Morgunov

The article presents a multilevel methodology for calculating effective sound velocities on acoustic paths in the Sea of Okhotsk based on all available historical deep-sea oceanological information from 1929 to 2020 and reference underwater acoustic signals. Processing of long-term arrays of oceanological data revealed seasonal and interannual features of the formation of sound velocity fields in the sea and the rules for grouping and processing initial data on acoustic paths. A prognostic equation (with a lead time of at least two months) has been developed to predict the type ("warm", "normal", "cold") of the thermal regime of the waters of the cold subsurface layer of the Sea of Okhotsk, where an underwater sound channel is formed. Interannual variations of climatic indices of the atmosphere and ocean and interannual variations of local parameters in the system "Atmosphere-Ice-Ocean" of the Sea of Okhotsk and adjacent regions of the land, the Pacific Ocean and the Sea of Japan, are used as predictors of the prognostic equation. The implementation of the technique significantly reduces the error in calculating the effective sound velocities on acoustic paths based on oceanological observations. Its implementation will be most in-demand in an onboard computer of an autonomous underwater object performing a mission on a relatively vast area test site with significantly changeable hydrological conditions and values of effective sound velocities along acoustic paths.

Keywords: water temperature, speed of sound, underwater sound channel, oceanological data, seasonal and interannual variability.

References

1. Tappert, F.D., Spiesberger, J.L., Wolfson, M.A. Study of a novel range-dependent propagation effect with application to the axial injection of signals from the Kaneohe source. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2002. Vol. 111. No. 2. P. 757.
2. Morgunov, Yu.N., Golov, A.A., Dubina, V.A., Luchin, V.A. Methodology for the application of oceanographic data for high-precision long-range observation of underwater objects. *Underwater exploration and robotics*. 2018. No. 2 (26). P. 49–54.
3. Zhigalov, I.A., Luchin, V.A. Interannual variability of bottom water temperature on the west Kamchatka shelf. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2005. No. 10. P. 55–61.
4. Luchin, V.A., Zhigalov, I.A. Types of water temperature distribution in active layer of the Okhotsk Sea and possibility of its prediction. *Izv. TINRO*. 2006. Vol. 147. P. 183–204.
5. Kitani K. An oceanographic study of the Okhotsk Sea-particularly in regard to cold waters. *Bull. Far Seas Fish. Res. Lab.* 1973. Vol. 9. P. 45–77.
6. Figurkin, A.L., Seasonal variability of oceanological conditions in the West-Kamchatka region based on the data of monitoring surveys in 1997 and 2000, *Izv. Tikhookean. Nauchno-Issled. Inst. Rybn. Khoz. Okeanogr.*, 2002. Vol. 130. P. 103–116.
7. Figurkin, A.L. Variability of temperature and salinity for bottom waters in the northern Okhotsk Sea. *Izv. TINRO*. 2011. Vol. 166. P. 255–274.
8. Chernyavskii, V.I., Variability of the cold core and prediction of the type of thermal regime in the north of the Sea of Okhotsk, *Okeanologicheskie osnovy biologicheskoi produktivnosti severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* (Oceanological Bases of Biological Productivity of the Northwestern Pacific Ocean), Vladivostok: TINRO, 1992. P. 104–113.
9. Luchin, V.A., Zhigalov, I.A., Plotnikov, V.V. The Interannual Variability of the Water Temperature of the Okhotsk Sea. *PICES Sci. Rep.* 2004. No. 27. P. 27–29.
10. World Ocean Database Select And Search [Electronic resource] NOAA National Centers For Environmental Information: [website]. URL: – <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/dbsearch.html> (accessed 10.04.2021).
11. Luchin, V.A., Matveev, V.I. Interannual variability of thermal state of the cold subsurface layer in the Okhotsk Sea. *Izv. TINRO*. 2016. Vol. 187. P. 205–216.
12. Moroshkin, K.V. *Vodnye massy Okhotskogo morya* (Water Masses of the Sea of Okhotsk). Moscow: Nauka, 1966. 70 p.
13. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time-Series [Электронный ресурс]. NOAA Physical Sciences Laboratory: [website]. URL: – <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/> (accessed 10.04.2021).
14. Plotnikov, V.V. Variability of ice conditions of Far Eastern Seas and their forecast. *Dal'nauka, Vladivostok*. 2002. 172 p.
15. NASA Worldview: [website]. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (accessed 10.04.2021)

About the authors

LUCHIN Vladimir Aleksandrovich, doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: oceanographic data sets, spatio-temporal variability of oceanographic parameters

Phone: +7 (423) 231-26-29

E-mail: vluchin@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0003-4136-302X

GOLOV Aleksander Aleksandrovich, PhD, senior research scientist

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: Acoustic tomography, hydroacoustic, underwater communications, underwater positioning

Phone: +7 (423) 231-14-00

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

ORCID ID: 0000-0002-7160-0076

SHESHEGOV Andrej Viktorovich, programmer

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Phone: +7 (423) 231-26-29

E-mail: tt6b24@mail.ru

DUBINA Vyacheslav Anatol'evich, PhD, Head of the Laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: satellite oceanology, satellite meteorology

Phone: +7 (904) 627-12-14

E-mail: dubina@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0003-3273-8977

MORGUNOV Yuri Nikolaevich, Doctor of Science, head of laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: ocean acoustics, acoustic navigation, acoustic ranging, underwater acoustic communication, acoustic tomography

Phone: +7 (423) 231-16-31

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0002-1961-1915

Recommended citation:

Luchin V.A., Golov A.A., Sheshegov A.V., Dubina V. A., Morgunov Yu.N. APPLICATION OF LONG-TERM ARRAYS OF OCEANOLOGICAL DATA AND REFERENCE HYDROACOUSTIC SIGNALS FOR REFINING THE METHOD OF CALCULATING THE EFFECTIVE SOUND SPEED ON ACOUSTIC PATHS IN THE SEA OF OKHOTSK. Underwater investigation and robotics. 2021. No. 2(36). P. 4–17. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_01.



СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ МАНИПУЛЯТОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ

А.Ю. Коноплин, А.П. Юрманов

Рассматривается система поддержки деятельности операторов подводных манипуляторов (ПМ), предназначенная для повышения эффективности сложных манипуляционных операций, выполняемых подводными аппаратами (ПА). Созданная система обеспечивает высокоточное наложение заранее построенных траекторий рабочих инструментов (РИ) многозвенных ПМ на поверхности известных подводных объектов, идентифицируемых с помощью систем технического зрения. При этом оператор наводит оптическую ось телекамеры, установленной на поворотной платформе ПА, и задает требуемую рабочую область. Затем желаемая траектория движения РИ ПМ проецируется на заданную область с учетом формы и пространственного расположения объекта рабочих действий. С помощью графического интерфейса, разработанного с использованием библиотек «OpenGL Core», оператор проверяет правильность наложения траектории на поверхность объекта. Сформированная траектория обрабатывается в автоматическом режиме РИ ПМ с требуемой ориентацией. Система предоставляет возможность визуального контроля выполнения манипуляционных операций путем автоматического наведения оптической оси телекамеры на РИ ПМ. Программная реализация системы выполнена на языке программирования C++. В виртуальной среде V-REP с использованием программного пакета Matlab/Simulink проведено численное моделирование работы предложенной системы в процессе управления многозвенным ПМ, установленным на ПА.

Ключевые слова: супервизорное управление, подводный аппарат, многозвенный манипулятор, облако точек, математическая модель, глубоководные исследования, пространственная траектория, подводные операции, система управления.

Введение

Подводные аппараты (ПА), оснащенные многозвенными подводными манипуляторами (ПМ), находят применение в различных сферах исследования и освоения Мирового океана. Аппараты такого типа позволяют очищать подводные конструкции [1], проводить диагностику подводных трубопроводов и кабелей [2, 3], работать с подводными клапанными системами [3, 4], выполнять сбор научного материала [5, 6], проводить археологические работы [7], очищать корпуса судов от обрастаний [8] и многое другое. При этом до сих пор остается актуальной проблема быстрой утомляемости операторов ПМ, которым одновременно с управлением задающим устройством (репликатором) приходится анализировать большой объем информации, отслеживать взаимное расположение ПА, рабочего инструмента (РИ) ПМ и объекта работ, не имея прямого контакта с этими объектами.

Для повышения эффективности манипуляционных работ и снижения психофизиологических нагрузок на операторов ПМ созданы компьютерные системы [9], позволяющие в реальном времени выполнять операции в супервизорном режиме. В таком режиме управления оператор задает только специальные целеуказания для ПМ, на основании которых в реальном масштабе времени формируются сигналы управления приводами в степенях подвижности ПМ. Некоторые компоненты таких систем испытаны на телеуправляемом ПА «Jason» [10]. В качестве альтернативы трудоемкого ручного управления ПМ в работе [11] предложена стратегия управления ПМ с использованием интерфейса взаимодействия с мозговыми волнами P300. Однако указанные системы не позволяют определять форму объектов работ и автоматически строить сложные пространственные траектории движения РИ ПМ по поверхности этих объектов.

Для обеспечения операторов ПМ наглядной информацией об объектах работ в статье [12] представлен метод, позволяющий строить карту глубины с помощью двух стереокамер, установленных на ПА. За счет совмещения полученной карты и реального изображения формируется объемное представление об окружающей среде, которое может быть использовано для управления ПМ в режиме дополненной реальности. В свою очередь, реализованный в работе [13] подход позволяет выполнять 3D-сканирование с помощью двух многолучевых гидроакустических сонаров ПА, а предложенный в работе [14] алгоритм обеспечивает быстрое реконструирование сканируемой поверхности с учетом наличия шумов в получаемых от многолучевого сонара данных. Перечисленные методы могут успешно использоваться для точного определения пространственного положения и формы подводных объектов с помощью распространенных подводных систем технического зрения (СТЗ).

Существующие системы и методы облегчают восприятие оператором окружающей подводной обстановки и упрощают процесс ручного управления ПМ, но не позволяют автоматизировать построение желаемых траекторий ПМ по поверхностям подводных объектов с последующей автоматической обработкой траекторий РИ ПМ. Следовательно, процесс управления ПМ все еще требует от операторов постоянного контроля и формирования управляющих воздействий. Это приводит к увеличению рабочей нагрузки на операторов и, соответственно, времени выполнения работ.

Поэтому для эффективного выполнения исследовательских и технологических манипуляционных работ операторы должны задавать целевые точки и желаемые пространственные траектории движения РИ ПМ по поверхностям подводных объектов, идентифицируемым с помощью СТЗ. После этого сформированные траектории в автоматическом режиме должны обрабатываться РИ ПМ с требуемой ориентацией. Для формирования таких целеуказаний в работе [15] предложено использовать телекамеру ПА, изменяющую пространственную ориентацию своей оптической оси. С помощью этого метода рассчитываются точки пересечения оптической оси телекамеры с триангуляционной поверхностью объектов, но формирование траекторий ПМ реализовано только для перемещения его РИ в вертикальной плоскости от точки к точке. В результате возникает потребность в создании такой системы, которая обеспечит высокоточное наложение заранее построенных пространственных траекторий ПМ на идентифицированные

поверхности известных подводных объектов. При этом операторы должны иметь возможность не только задавать целеуказания, но и осуществлять проверку построения траекторий ПМ на поверхностях подводных объектов. Кроме того, для обеспечения визуального контроля с высококачественной видеофиксацией процесса выполнения манипуляционной операции необходимо автоматическое наведение оптической оси телекамеры на РИ ПМ в процессе его движения.

1. Построение сложных траекторий движения РИ ПМ по поверхностям подводных объектов

Для манипуляций с подводными клапанными системами, очистки конструкций от заиливания и обрастания, измерения толщины стенок трубопроводов и т. д. РИ ПМ должен двигаться по нелинейным пространственным траекториям. Форма таких объектов работ, как правило, известна, и в этих случаях указанные траектории могут быть построены заранее с учетом требований к выполнению конкретных технологических операций. При этом оператор может визуально определить область подводного объекта, на которую заданная траектория должна быть наложена.

Рассмотрим пример супервизорного управления ПМ со стабилизацией ПА в режиме зависания над подводным объектом [16, 17]. Будем считать, что объект находится в зоне сканирования СТЗ и что это позволяет с высокой точностью формировать облака точек, принадлежащих поверхности этого объекта. На основе облаков точек известными методами [14, 18] строится триангуляционная модель указанной поверхности, представляющая собой множество треугольных пластин, сшитых между собой.

Желаемая траектория движения РИ ПМ может быть изначально задана в виде последовательности точек B_j , где $j = \overline{1, c}$, c – порядковый номер точки в последовательности перемещения РИ ПМ. Также указанная траектория может быть определена в аналитическом виде в связанной с корпусом ПА системе координат (СК) $Oxuz$, начало которой – O расположено в центре величины (водоизмещения) ПА, ось x совпадает с продольной осью ПА, ось z – с его вертикальной осью, а ось y составляет с ними правую тройку. Например, если эта траектория задана в плоскости Oxy в виде $y = f(x)$, то проецироваться на поверхность объекта она должна в направлении еди-

ничного вектора \vec{d} , совпадающего с отрицательным направлением оси z . Чтобы правильно наложить заданную траекторию на объект работ, оператору необходимо указать границы, между которыми желаемая траектория должна быть автоматически спроецирована на поверхность объекта с учетом формы и пространственного расположения этой области объекта. Для формирования целеуказаний может использоваться телекамера ПА, изменяющая пространственную ориентацию своей оптической оси [15]. Посредством наведения этой оптической оси оператор задает начальную A_1 и конечную A_2 точки, принадлежащие подводному объекту и определяющие начало и конец движения РИ ПМ по траектории (рис. 1).

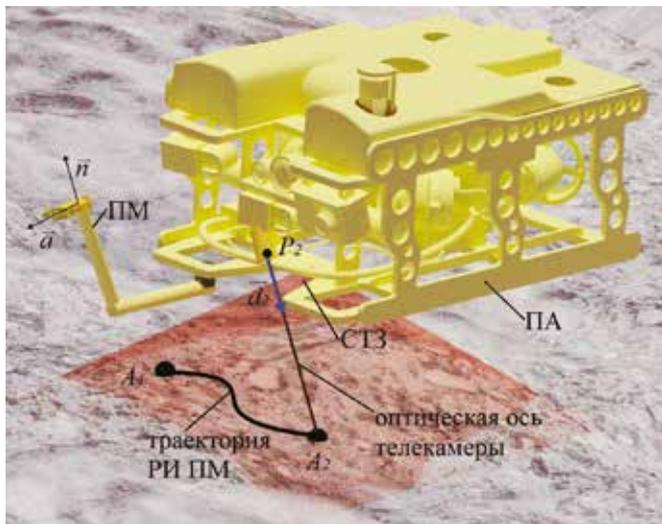


Рис. 1. Выполнение операции в супервизорном режиме

В этом случае точка A_i ($i = \overline{1,2}$) в СК $Oxyz$ будет являться пересечением оптической оси телекамеры, совпадающей с единичным вектором \vec{d}_i , выходящим из точки P_i в направлении подводного объекта (см. рис. 1), с триангуляционной поверхностью, где k -й треугольник задается координатами трех вершин $V_{k0}, V_{k1}, V_{k2}, k = \overline{1,g}, g$ – количество треугольников.

Согласно методу [15], для нахождения в СК $Oxyz$ координат каждой целевой точки A_i вначале определяется, какой из всех g треугольников триангуляционной поверхности в текущий момент времени пересекается оптической осью телекамеры. Треугольник k с вершинами V_{k0}, V_{k1} и V_{k2} , который пересекает эта ось, находится из условий [19]: $0 \leq u_{ik} \leq 1, 0 \leq v_{ik} \leq 1, u_{ik} + v_{ik} \leq 1$, где u_{ik}, v_{ik} – барицентрические координаты точки A_i относительно вершин k -го треугольника. При

этом координаты точки A_i пересечения оси телекамеры с треугольником k вычисляются с помощью выражения [15]:

$$A_i = P_i + \frac{((P_i - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(\vec{d}_i \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{d}_i, \quad (1)$$

где (\cdot) – скалярное произведение векторов; (\times) – векторное произведение векторов.

Для проецирования на участок триангуляционной поверхности объекта работ, заключенный между точками A_1 и A_2 , заданную в аналитическом виде траекторию сначала нужно преобразовать в последовательность вспомогательных точек B_j . В таком случае координаты точек B_j вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} B_{jx} &= B_{(j-1)x} + g \\ B_{jy} &= f(B_{jx}) \\ B_{jz} &= 0, \end{aligned}$$

где $f(B_{jx})$ – зависимость y от x согласно заданному аналитическому выражению $y = f(x), B_{1x} = 0; g$ – шаг по оси x , определяющий количество вспомогательных точек B_j и задаваемый в зависимости от параметров этой траектории, а также от степени детализации сканирования подводного объекта. Увеличение количества точек B_j повышает точность сформированной траектории, однако увеличивает количество дальнейших вычислений.

Чтобы при проецировании точек B_j учесть пространственное расположение и ориентацию области объекта работ, необходимо сначала выполнить поворот всех векторов, соединяющих начало O СК $Oxyz$ с точками B_j , на угол $\alpha = \angle(x, \overline{A_1 A_2})$ вокруг оси z . Затем выполняется поворот вокруг оси y СК $Oxyz$ на угол φ , заключенный между вектором $\overline{A_1 A_2}$ и плоскостью Oxy . После этого необходимо выполнить линейный перенос полученных векторов вдоль осей x и y на значения A_{1x} и A_{1y} соответственно. В результате координаты искомых точек B'_j будут определяться с помощью выражения:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B'_{jx} \\ B'_{jy} \\ B'_{jz} \end{bmatrix} &= R \begin{bmatrix} B_{jx} \\ B_{jy} \\ B_{jz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{1x} \\ A_{1y} \\ 0 \end{bmatrix} \\ R &= R_{z\alpha} R_{y\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \alpha & -\sin \alpha & \sin \varphi \cos \alpha \\ \cos \varphi \sin \alpha & \cos \alpha & \sin \varphi \sin \alpha \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (2) \end{aligned}$$

где $R_{z\alpha}$ и $R_{y\varphi}$ – матрицы элементарных поворотов вокруг осей z и y соответственно, R – матрица сложного поворота [20].

Пересечения проецирующих лучей, выходящих из точек B_j в направлении вектора \vec{o} , с триангуляционной моделью поверхности образуют точки T_j (см. рис. 2). Координаты точек T_j , последовательность которых описывает расположенную между заданными оператором точками A_1, A_2 желаемую траекторию РИ ПМ, определяются с помощью алгоритма Моллера–Трумбора [19] с учетом выражения (1) в виде:

$$T_j = B'_j + \frac{((B'_j - V_{k0}) \times (V_{k1} - V_{k0})) \cdot (V_{k2} - V_{k0})}{(\vec{o} \times (V_{k2} - V_{k0})) \cdot (V_{k1} - V_{k0})} \vec{o}.$$

В результате формируется множество точек T_j , через которые ПМ должен провести свой РИ с требуемой ориентацией, задаваемой единичными векторами \vec{a}_j и \vec{n}_j (см. рис. 1). При этом если необходимо перемещать РИ перпендикулярно поверхности, то в точке T_j вектор \vec{a}_j подхода РИ должен являться перпендикуляром к плоскости, заданной тремя вершинами k -го треугольника, которому принадлежит указанная точка, а вектор \vec{n}_j нормали к \vec{a}_j всегда параллелен вектору $T_j T_{j+1}$,

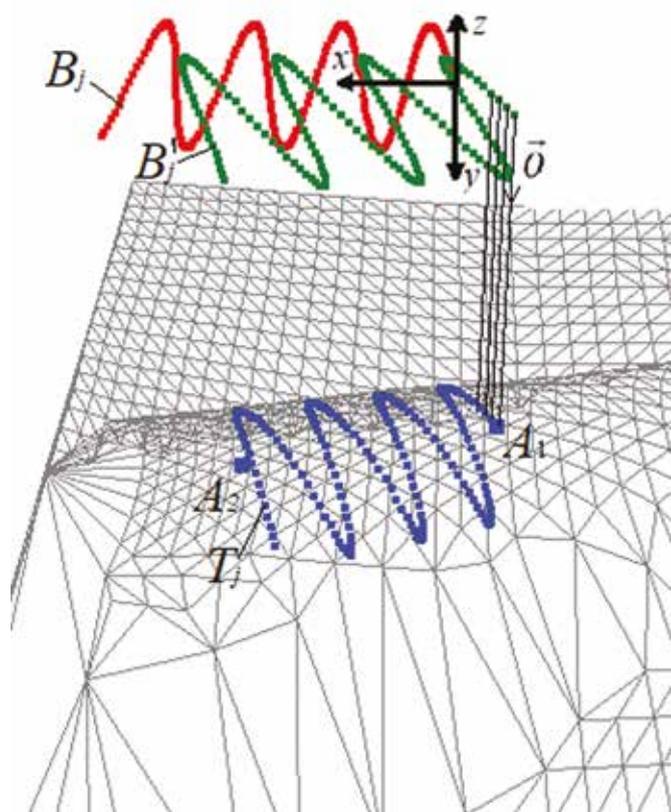


Рис. 2. Наложение желаемой траектории движения РИ ПМ на поверхность подводного объекта

соединяющему пройденную и следующую точку множества. В результате полученная последовательность точек T_j и соответствующих им векторов \vec{a}_j и \vec{n}_j формирует траекторию движения РИ.

Необходимо отметить, что для поиска точки T_j предполагается проверка факта пересечения каждого треугольника триангуляции лучом, выходящим из точки B'_j . Если для каждого луча начинать поиск пересекаемого треугольника с самого первого, то на поиск всех точек пересечения может уйти достаточно много времени из-за ограниченности вычислительных ресурсов, особенно при большом количестве проецирующих лучей или треугольников. Для решения этой проблемы необходимо уменьшить количество ложных операций, при которых выбранный треугольник не будет иметь точек пересечения с лучом. Поэтому при поиске точки T_{j+1} необходимо сначала проверять пересечение луча, выходящего из точки B'_{j+1} , с треугольником, в котором находится точка T_j . Если пересечение не было найдено, начинается поиск пересекаемого треугольника в обычном режиме, начиная с первого.

Для плавного перемещения ПМ полученная траектория движения его РИ может быть сглажена В-сплайнами с помощью алгоритма [21], после чего эта траектория должна быть отработана в автоматическом режиме высокоточными системами управления ПМ [22, 23] с возможностью коррекции скорости движения РИ [24].

2. Программная реализация системы поддержки деятельности операторов ПМ

Разработанная система реализована на языке программирования C++. Входными данными для программы является множество принадлежащих поверхности дна точек, получаемых с помощью СТЗ и определяемых в трехмерном пространстве. В эту же программу заносятся задаваемые оператором координаты точек P_i и векторов \vec{d}_i , определяющих расположение оптической оси телекамеры в СК $Oxuz$.

Программа строит триангуляционную модель поверхности подводного объекта, используя алгоритм [18]. После задания оператором точек P_i и векторов \vec{d}_i рассчитываются координаты целевых точек A_i , а также формируется последовательность точек T_j (см. рис. 2) и соответствующих им векторов \vec{a}_j и \vec{n}_j РИ ПМ.

Для более точного представления формы подводных объектов, а также последующего контроля формирования траекторий движения РИ ПМ создан графический интерфейс (рис. 3) с использованием библиотек «OpenGL Core». Указанный интерфейс в реальном масштабе времени отображает триангуляционную поверхность объекта работ, спроецированную на эту поверхность траекторию, а также видеоизображение с камеры. С использованием этой наглядной информации оператор может проверить автоматически сформированную траекторию до начала выполнения манипуляционных работ.

Проверка работоспособности предложенного метода выполнялась с помощью численного моделирования в виртуальной среде V-REP. С этой целью была создана сцена для выполнения различных манипуляционных операций с помощью ПМ, установленного на ПА (рис. 4, а), в частности операций по очистке протяженной конструкции (трубопровода) от обрастаний. В качестве СТЗ используется модель многолучевого гидроакустического сонара с разрешением 32*32 точки, построенная с учетом однонаправленного характера сканирования.

Сформированная последовательность точек T_j и соответствующих им векторов \vec{a}_j и \vec{n}_j РИ ПМ (рис. 4, б) отправляется в программный пакет Matlab/Simulink через протокол UDP. В Matlab/Simulink полученная последовательность сглаживается параметрическими В-сплайнами третьего порядка [21] и подается в качестве программных сигналов управления на динамическую модель ПМ [23], установленного на ПА. Причем ПА удерживается в заданной точке

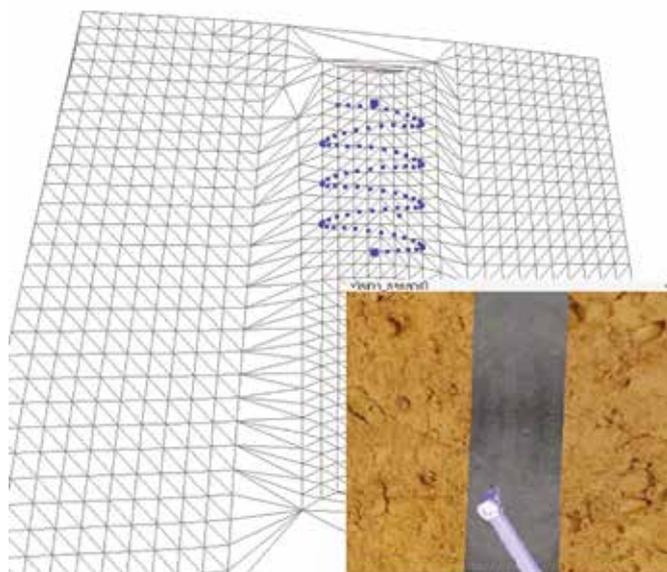
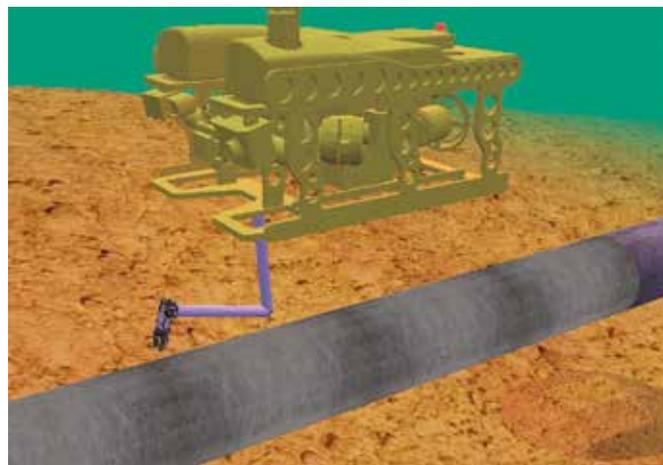


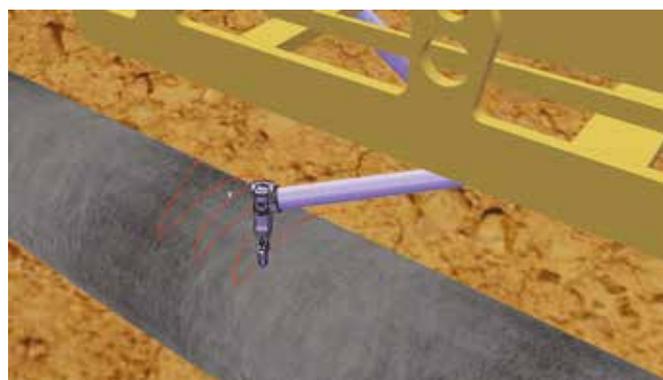
Рис. 3. Интерфейс для контроля формирования траекторий движения РИ ПМ

пространства с помощью системы автоматической стабилизации [16, 17]. Для того чтобы визуализировать движение ПМ по поверхности объекта работ, получаемые в процессе моделирования данные от динамической модели ПА с ПМ отправлялись из Matlab/Simulink обратно в V-REP через протокол UDP. К этим данным относятся изменения реальных обобщенных координат ПМ, а также линейные и угловые смещения ПА относительно исходной точки его стабилизируемого удержания. В результате в среде V-REP посредством перемещения относительно 3D-модели трубопровода 3D-моделей ПА с ПМ с учетом динамики этих объектов достигается наглядная визуализация выполнения технологической манипуляционной операции (см. рис. 4, а, б).

На основе оценки взаимного расположения поверхности трубопровода и РИ ПМ (см. рис. 4, б) были сделаны выводы, что отработка автоматически сформированных с помощью предложенной системы траекторий позволяет ПМ точно выполнять достаточно сложные манипуляционные операции. Указанные траектории формируются в реальном масштабе времени и отображаются разработанным графическим



а



б

Рис. 4. Модель ПА, ПМ и объекта работ в V-REP (а) и сформированная траектория движения РИ ПМ (б)

интерфейсом, что упрощает контроль выполнения работы. При этом наблюдается значительное снижение рабочей нагрузки, оказываемой на оператора, поскольку он задает только целеуказания и проверяет правильность автоматического построения траекторий на поверхности объекта работ с помощью графического интерфейса. Программная реализация предложенной системы не вызывает принципиальных затруднений.

3. Визуальный контроль выполнения манипуляционных операций

Управляя ПМ в ручном и (или) супервизорном режимах, операторы контролируют этот процесс по видеоизображению, получаемому от телекамеры ПА. Часто угол обзора таких телекамер не позволяет охватить всю рабочую зону ПМ. Кроме того, операторам постоянно приходится использовать оптический зум телекамеры для точного позиционирования РИ относительно объекта и высококачественной видеосъемки, что значительно уменьшает охватываемую зону видимости камеры. Поэтому для нахождения РИ перемещающегося ПМ в центре видеокадра приходится вручную наводить на этот инструмент оптическую ось телекамеры, управляя приводами поворотной платформы, на которой установлена камера.

Для автоматизации трудоемкого процесса управления ориентацией поворотной платформы в патенте [25] описан способ автоматического наведения продольной оси телекамеры ПА на РИ ПМ. Этот способ был реализован в системе поддержки деятельности операторов ПМ, которая с учетом информации о текущем местоположении РИ ПМ вычисляет углы поворота степеней подвижности платформы с телекамерой, при которых оптическая ось этой камеры пересекает характерную точку РИ.

Для представленной на рис. 5 распространенной кинематической схемы поворотной платформы геометрическим способом были выведены выражения, определяющее зависимость углов q_1 и q_2 поворота платформы от положения РИ в передней полусфере перед ПА:

$$q_1 = \arctg(P_{x_k} / P_{y_k}), \quad -\frac{\pi}{2} < q_1 < \frac{\pi}{2},$$

$$q_2 = \arctg(\sqrt{(C_{x_k} - P_{x_k})^2 + (C_{y_k} - P_{y_k})^2} / C_{z_k}), \quad -\frac{\pi}{2} < q_2 < \frac{\pi}{2},$$

где $C = [C_{x_k}, C_{y_k}, C_{z_k}]$ – точка с координатами текущего положения РИ ПМ в СК $x_k y_k z_k$, начало которой расположено в точке пересечения осей шарниров поворотной платформы (см. рис. 5), а оси x_k, y_k, z_k

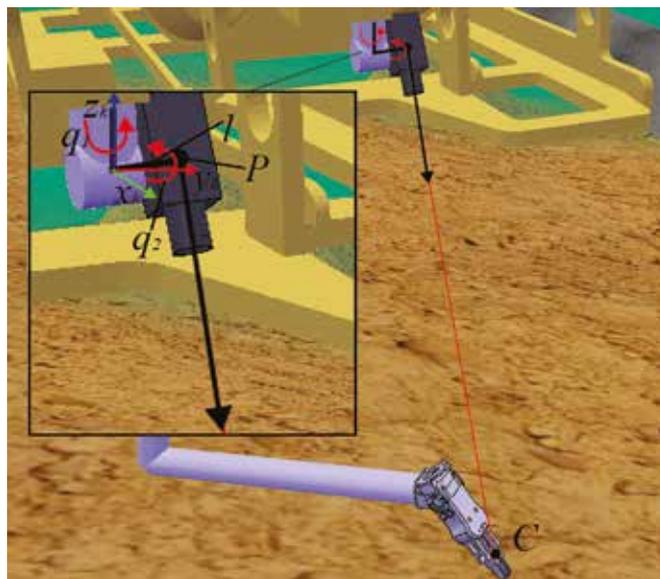


Рис. 5. Поворотная платформа телекамеры

всегда параллельны и сонаправлены соответствующим осям x, y, z СК $Oxyz$. Координаты точки $P = [P_{x_k}, P_{y_k}, P_{z_k}]$ пересечения второго шарнира и оптической оси телекамеры в СК $x_k y_k z_k$ определяются из уравнения: $(C_{x_k}^2 + C_{y_k}^2)P_{x_k}^2 - 2C_{x_k}P_{x_k} + l^2(l^2 - C_{y_k}^2) = 0$, $P_{y_k} = \sqrt{l^2 - P_{x_k}^2}$ и $P_{z_k} = 0$.

Программная реализация подсистемы визуального контроля выполнена на языке программирования C++ с визуализацией в среде V-REP, а аппаратная реализация – на созданной лабораторной установке, включающей в себя трехстепенной ПМ типа PUMA, задающий репликатор и телекамеру, закрепленную на двухстепенной поворотной платформе (рис. 6). В качестве вычислительного устройства использовался контроллер Arduino Mega 2560. Полученное с телекамеры видеоизображение в реальном времени выводилось на монитор оператора.

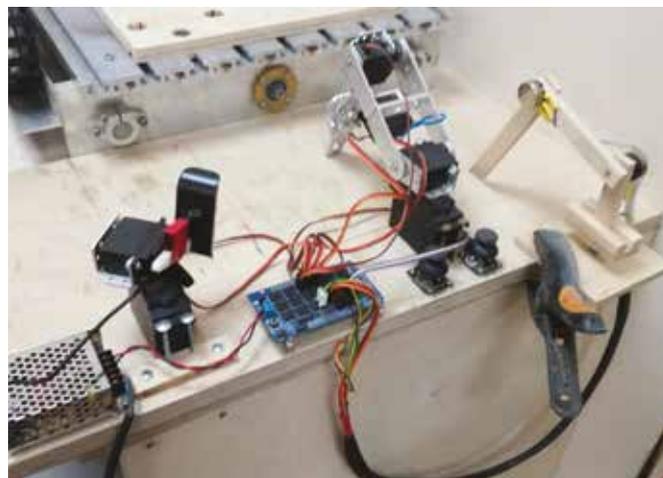


Рис. 6. Лабораторная установка

В результате моделирования, а также испытаний на лабораторной установке были сделаны выводы, что представленная подсистема обеспечивает визуальный контроль за движениями РИ в рабочей зоне ПМ, ограниченной передней полусферой. Очевидно, что реализация этой подсистемы не вызывает затруднений, так как для вычисления углов q_1 и q_2 поворота платформы достаточно типового контроллера, что было показано на примере представленной установки, оснащенной контроллером Arduino.

Заключение

Разработанная система поддержки деятельности операторов ПМ может использоваться для выполнения в супервизорном режиме многих подводных манипуляционных работ. При этом траектории и ориентация в процессе движения РИ ПМ формируются на основе математической модели объекта работ с учетом требований к выполнению конкретных технологических операций. Разработанная система реализована в виде программы, обладающей следующими функциональными возможностями:

- обеспечивает построение триангуляционных моделей поверхности подводных объектов и форми-

рование пространственных траекторий движения РИ ПМ на основе целеуказаний, задаваемых оператором;

- отображает с помощью графического интерфейса триангуляционную поверхность объекта работ, спроецированную на эту поверхность траекторию, а также видеоизображение с телекамеры. Эта наглядная информация используется операторами для проверки автоматически построенных траекторий перед выполнением манипуляционных работ;

- сформированные пространственные траектории движения РИ ПМ передаются системе управления ПМ, обеспечивающей высокоточную обработку траекторий РИ в автоматическом режиме;

- позволяет осуществлять визуальный контроль манипуляционных операций с помощью автоматического наведения оптической оси телекамеры на РИ ПМ в процессе его движения.

Результаты численного моделирования работы предложенной системы в процессе управления ПМ, установленным на ПА, подтвердили ее работоспособность и простоту практической реализации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 20-38-70161, № 19-08-00347_А).

ЛИТЕРАТУРА

1. Davey V.S., Forli O., Raine G.A., Whillock R. Non-Destructive Examination of Underwater Welded Structures // Woodhead Publishing. 1999. P. 1372.
2. Gracias X., Negahdaripour S. Underwater mosaic creation using video sequences from different altitudes // Proc. of OCEANS 2005 MTS/IEEE. 2005. P. 1295–1300.
3. Christ R.D., Wernli Sr R.L. The ROV manual: a user guide for remotely operated vehicles // Elsevier Science. 2013.
4. Carrera A., Ahmadzadeh S., Ajoudani A., Kormushev P., Carreras M., Caldwell D. Towards autonomous robotic valve turning // Cybernetics and Information Technologies. 2012. Vol. 12, No. 3. P. 17–26.
5. Коноплин А.Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н., Кузнецов А.Л., Московцева А.В. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 4–12.
6. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Разработка и натурные испытания системы интеллектуальной поддержки деятельности операторов ТНПА // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 12–20.
7. Coleman D.F., Ballard R.D., Gregory T. Marine archaeological exploration of the Black Sea // Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future. 2003. Vol. 3. P. 1287–1291.
8. Hachicha S., Zaoui C., Dallagi H., Nejim S., Maalej A. Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning // Ocean Engineering. 2019. Vol. 181. P. 303–313.
9. Yoerger D., Slotine J.J. Supervisory control architecture for underwater teleoperation // Proc. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1987. Vol. 4. P. 2068–2073.
10. Yoerger D., Newman J., Slotine J. J. Supervisory control system for the JASON ROV // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1986. Vol. 11, No. 3. P. 392–400.
11. Zhang J., Li W., Yu J., Mao X., L M., Chen G. Operating an underwater manipulator via P300 brainwaves // 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). 2016. P. 1–5.
12. Sivčev S., Rossi M., Coleman J., Dooly G., Omerđić E., Toal D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs // Control Engineering Practice. 2018. Vol. 74. P. 153–167.
13. Joe H., Kim J., Yu S.C. Sensor fusion-based 3d reconstruction by two sonar devices for seabed mapping // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52, No. 21. P. 169–174.
14. Marton Z.C., Rusu R.B., Beetz M. On fast surface reconstruction methods for large and noisy point clouds // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2009. P. 3218–3223.
15. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Коноплин Н.Ю. Метод супервизорного управления манипулятором подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 2. С. 95–99.
16. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53–56.

17. Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Ч. 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 29–34.
18. Point Cloud Library: Fast triangulation of unordered point clouds – <http://ns50.pointclouds.org/>
19. Möller T., Trumbore B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection // Journal of graphics tools. 1997. Vol. 2, No. 1. P. 21–28.
20. Craig J.J. Introduction to robotics: mechanics and control // Prentice Hall. 2003. P. 450.
21. Filaretov V.F., Gubankov A.S., Gornostaev I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed// Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016), 03–05 October 2016, Jakarta, Indonesia. P. 93–96.
22. Филаретов В. Ф., Коноплин А. Ю., Зуев А. В., Красавин Н. А. Метод синтеза систем высокоточного управления перемещениями подводных манипуляторов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4(34). С. 31–37.
23. Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. Development of Control Systems for Implementation of Manipulative Operations in Hovering Mode of Underwater Vehicle // OCEANS 2016. Shanghai, China. ISBN: 978-1-4673-9724-7. DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485692.
24. Филаретов В.Ф., Юхимец Д.А., Коноплин А.Ю. Метод синтеза системы автоматического управления режимом движения схвата манипулятора по сложным пространственным траекториям // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 47–54.
25. Пат. 2556441 РФ, МПК G05B 11/10, G02B 23/22. Способ автоматического наведения телекамеры / Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю. – № 2014104347/08, заявл.: 07.02.2014; опубл.: 10.07.2015, Бюл. № 19.

Об авторах

КОНОПЛИН Александр Юрьевич, к.т.н., заведующий лабораторией

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем морских технологий ДВО РАН;

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Научные интересы: автоматическое управление подводными роботами и манипуляторами, адаптивное управление, информационно-управляющие системы

Тел.: +7 (924) 429-83-96

Е-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID ID: 0000-0001-7554-1002

ЮРМАНОВ Александр Павлович, инженер

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт проблем морских технологий ДВО РАН;

Дальневосточный федеральный университет

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Тел.: +7(914)678-60-60

Е-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID ID: 0000-0001-6849-3700

Для цитирования:

Коноплин А.Ю., Юрманов А.П. СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ МАНИПУЛЯТОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2 (36). С. 18–27. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_02.



SUPPORT SYSTEM FOR OPERATOR OF MANIPULATOR MOUNTED ON UNDERWATER VEHICLE

A.Yu. Konoplin, A.P. Yurmanov

The article considers a support system for underwater manipulators (UM) operators, which is designed for improving the execution efficiency of complex manipulative operations performed by underwater vehicles (UV). The designed system provides a high-precision superimposition of pre-constructed trajectories of multi-joint UM's working tool (WT) onto a surface of a known underwater object, identified by technical vision systems. In this case, the operator directs the optical axis of the camera, mounted on the UV's rotary platform, and sets the required object's area. Then the desired trajectory of the UM's WT is projected on the specified area, taking into account the shape and spatial location of the object. The operator checks whether the trajectory is correctly applied to the object surface using a graphical interface developed using "OpenGL Core" libraries. Then, the formed trajectory is being passed by WT with the required orientation in the automatic mode. The system provides visual control of manipulative operations by automatically pointing the camera's optical axis at the UM's WT. The software implementation of the system is performed in the C++ programming language. A numerical simulation of the proposed system operation in the process of control of the multi-joint UM installed on the UV was performed in the V-REP virtual environment, using the Matlab/Simulink software.

Keywords: supervisory control, underwater vehicle, multi-joint manipulator, point cloud, mathematical model, deep-sea exploration, spatial trajectory, underwater operations, control system.

References

1. Davey, V.S.; Forli, O.; Raine, G.A.; Whillock, R. Non-Destructive Examination of Underwater Welded Structures. Woodhead Publishing. 1999. P. 1372.
2. Gracias, X.; Negahdaripour, S. Underwater mosaic creation using video sequences from different altitudes. Proc. of OCEANS 2005 MTS/IEEE, 2005. P. 1295–1300
3. Christ, R.D.; Wernli, Sr R.L. The ROV manual: a user guide for remotely operated vehicles. Elsevier Science. 2013.
4. Carrera, A.; Ahmadvadeh, S.; Ajoudani, A.; Kormushev, P.; Carreras, M.; Caldwell, D. Towards autonomous robotic valve turning. Cybernetics and Information Technologies. 2012. Vol. 12, No. 3. P. 17–26.
5. Konoplin, A.Yu.; Denisov, V.A.; Dautova, T.N.; Kuznetsov, A.L.; Moskovtseva, A.V. Tekhnologiya ispol'zovaniya TNPA dlya kompleksnogo issledovaniya glubokovodnykh ekosistem (Technology of using ROV for complex research of deep-sea ecosystems). Underwater investigation and robotics. 2019. No. 4 (30). P. 4–12.
6. Filaretov, V.F.; Konoplin, A.Yu.; Konoplin, N.Yu. *Razrabotka i natsionnyye ispytaniya sistemy intellektual'noy podderzhki deyatel'nosti operatorov TNPA* (Development and field testing of the system of intellectual support for the activities of ROV operators). Underwater investigation and robotics. 2018. No. 2 (26). P. 12–20.
7. Coleman, D.F.; Ballard, R.D.; Gregory, T. Marine archaeological exploration of the Black Sea. Oceans 2003. Celebrating the Past... Teaming Toward the Future. 2003. Vol. 3. P. 1287–1291.
8. Hachicha, S.; Zaoui, C.; Dallagi, H.; Nejim, S.; Maalej, A. Innovative design of an underwater cleaning robot with a two arm manipulator for hull cleaning. Ocean Engineering. 2019. Vol. 181. P. 303–313.
9. Yoerger, D.; Slotine, J.J. Supervisory control architecture for underwater teleoperation. Proc. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1987. Vol. 4. P. 2068–2073.
10. Yoerger, D.; Newman, J.; Slotine, J.J. Supervisory control system for the JASON ROV. IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1986. Vol. 11, No. 3. P. 392–400.
11. Zhang, J.; Li, W.; Yu, J.; Mao, X.; L M.; Chen, G. Operating an underwater manipulator via P300 brainwaves. 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP). 2016. P. 1–5.
12. Sivčev, S.; Rossi, M.; Coleman, J.; Dooly, G.; Omerdić, E.; Toal, D. Fully automatic visual servoing control for work-class marine intervention ROVs. Control Engineering Practice. 2018. Vol. 74. P. 153–167.
13. Joe, H.; Kim, J.; Yu, S.C. Sensor fusion-based 3d reconstruction by two sonar devices for seabed mapping. IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52, No. 21. P. 169–174.
14. Marton, Z.C.; Rusu, R.B.; Beetz, M. On fast surface reconstruction methods for large and noisy point clouds. 2009 IEEE international conference on robotics and automation. 2009. P. 3218–3223.
15. Filaretov, V.F.; Konoplin, A.Yu.; Konoplin, N.Yu. Metod supervizornogo upravleniya manipulyatorom podvodnogo robota (Method of supervising control of the underwater robot manipulator). Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. 2018. T. 19, №. 2. S. 95–99.
16. Filaretov, V.F.; Konoplin, A.Yu. Sistema avtomaticheskoy stabilizatsii podvodnogo apparata v rezhime zavisaniya pri rabotayushchem mnogozvennom manipulyatore. Chast' 1 (System of automatic stabilization of underwater vehicle in stationkeeping regime with working manipulator. Part 1). Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. 2014. No. 6. P. 53–56.
17. Filaretov, V.F.; Konoplin, A.Yu. Sistema avtomaticheskoy stabilizatsii podvodnogo apparata v rezhime zavisaniya pri rabotayushchem mnogozvennom manipulyatore. Chast' 2 (System of automatic stabilization of underwater vehicle in stationkeeping regime with working manipulator. Part 2). Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. 2014. No. 7. P. 29–34.18.

18. Point Cloud Library: Fast triangulation of unordered point clouds <http://ns50.pointclouds.org/>

19. Möller ,T.; Trumbore, B. Fast, minimum storage ray-triangle intersection. *Journal of graphics tools*. 1997. Vol. 2, No. 1. P. 21–28.

20. Craig, J.J. *Introduction to robotics: mechanics and control*. Prentice Hall. 2003. P. 450.

21. Filaretov, V.F.; Gubankov, A.S.; Gornostaev, I.V. The Formation of Motion Laws for Mechatronics Objects Along the Paths with the Desired Speed. *Proc. of International Conference on Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA 2016)*, 03–05 October 2016, Jakarta, Indonesia. P. 93–96.

22. Filaretov, V.F.; Konoplin, A.Yu.; Zuyev, A.V.; Krasavin, N.A. Metod sinteza sistem vysokotochnogo upravleniya peremeshcheniyami podvodnykh manipulyatorov (Method of synthesis of high-precision motion control systems for underwater manipulators). *Underwater investigation and robotics*. 2020. No. 4(34). P. 31–37.

23. Filaretov, V.F.; Konoplin, A.Yu. Development of Control Systems for Implementation of Manipulative Operations in Hovering Mode of Underwater Vehicle. *OCEANS 2016*. Shanghai, China. International IEEE Conference, 2016, ISBN: 978-1-4673-9724-7, DOI: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485692.

24. Filaretov, V.F.; Yukhimets, D.A.; Konoplin, A.Yu. Metod sinteza sistemy avtomaticheskogo upravleniya rezhimom dvizheniya skhvata manipulyatora po slozhnym prostranstvennym trayektoriyam (Method of synthesis of the system of automatic control of the mode of movement of the grip of the manipulator on complex spatial trajectories). *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*. 2012. No. 6. P. 47–54.

25. Pat. 2556441 RF, MPK G05B 11/10, G02B 23/22. Sposob avtomaticheskogo navedeniya telekamery (Method for automatic aiming of the camera) / Filaretov V.F., Konoplin A.Yu. – No. 2014104347/08, yayavl.: 07.02.2014; opubl.: 10.07.2015, Byul. № 19.

About the authors

KONOPLIN Alexander Jurevich, Ph.D, head of laboratory
Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of
RAS;
Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch
of RAS

Research interests: automatic control of underwater robots and
manipulators, adaptive control, information and control systems
Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Phone: +7(924)429-83-96

E-mail: kayur-prim@mail.ru

ORCID ID: 0000-0001-7554-1002

YURMANOV Aleksandr Pavlovich, engineer
Institute of Marine Technology Problems Far Eastern Branch of
RAS;

Far Eastern Federal University

Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a

Phone: +7(914)678-60-60

E-mail: yurmanov_a@mail.ru

ORCID ID: 0000-0001-6849-3700

Recommended citation:

Konoplin A.Yu., Yurmanov A.P. SUPPORT SYSTEM FOR OPERATOR OF MANIPULATOR MOUNTED ON UNDERWATER VEHICLE. *Underwater investigation and robotics*. 2021. No. 2(36). P. 18–27. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_02.



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЯПОНСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Д.Д. Каплуненко, В.А. Дубина, Ю.Н. Моргун, А.А. Голов

Оценка максимально точных значений горизонтальной и вертикальной скорости звука в морских и океанических бассейнах с целью точного позиционирования необитаемых движущихся подводных объектов в водной толще является одной из важнейших задач нескольких смежных областей морских наук – гидроакустики, спутниковой и классической океанологии. При этом получение решения задачи возможно только косвенным путем, через сбор информации о температуре и солёности среды методами дистанционного зондирования и измерения *in situ*, с последующим моделированием и восстановлением отсутствующих данных. В данной работе показано, как может быть выполнено восстановление поля скорости звука с разрешением до 1 км за счет данных спутниковых наблюдений инфракрасного и видимого диапазонов и данных гидродинамического моделирования в районе северо-западной части Японского моря, включающей в себя район залива Петра Великого и фронтальную зону разделения системы течений в районе возвышенности Ямато. По результатам расчетов сделана оценка влияния на скорость звука изменчивости по температуре и солёности в зависимости от их реальных значений, наблюдаемых для региона исследований. Данная постановка эксперимента позволяет в итоге оценить возможное сокращение ошибки позиционирования подводного аппарата, которое может возникать при использовании вышеуказанных наборов данных совместно. Метод восстановления скоростей звука применим в зимнее время, в отсутствие сезонного термоклина.

Ключевые слова: Японское море, спутниковые данные, поля скорости звука, коррекция скорости звука, радиометр NOAA AVHRR/3, гидродинамическая модель NEMO.

Введение

Повышение точности определения скорости звука на основе различных имеющихся данных наблюдений и их реанализа, которые определяют её косвенно (через соотношения температуры и солёности морской воды) является сложной и актуальной задачей, предполагающей различные варианты решения, в зависимости от доступных данных. Уменьшение ошибки позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в данной работе выполняется за счет снижения ошибок определения скорости звука исходя из тех данных наблюдений, которые доступны для такого района в контактном (*in situ*) или дистанционном (спутниковые измерения, термометрия) виде. В данном случае мы рассматриваем использование спутниковых измерений температуры поверхности моря, как было уже выполнено

в [1], но с важными дополнениями и изменениями, которые вносятся за счет использования данных реанализа, полученных на основе гидродинамического моделирования. Температура воды дистанционными методами измеряется в среднем инфракрасном (ИК) (MWIR, длина волны 3–4 мкм) и тепловом ИК (TIR, длина волны 8–12 мкм) диапазонах электромагнитного спектра, а также на малых частотах (6–10 ГГц) микроволнового диапазона. Сенсоры установлены на спутниках, работающих на геостационарных и солнечно-синхронных приполярных орбитах.

Основные проблемы использования *ИК-диапазона* – облачность и коррекция влияния атмосферы (аэрозоли и водяной пар). Недостатки *микроволновых* измерений – низкое пространственное разрешение и влияние на интенсивность излучения шероховатости поверхности моря. Для многих акваторий Мирового океана наличие облачности ограничивает воз-

возможности использования спутниковых измерений в ИК-диапазоне. А пассивные микроволновые данные не удовлетворяют современным требованиям к пространственной и временной детализации карт температуры поверхности моря и вообще неприменимы в прибрежных районах (в полосе шириной 1–2 пикселя исходного раstra яркостных температур, что может достигать 100 км).

Поэтому различные научные коллективы работают над проектами, результатом которых являются восстановленные разными способами пространственно-временные ряды температуры поверхности океана (ТПО) на основе методов оптимальной интерполяции и объективного анализа, где на входе используются все имеющиеся данные о температуре морской поверхности: *in situ* и спутниковые ИК и микроволновые измерения. Один из наиболее известных современных проектов в этой области – The Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST), который ведётся в The Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) NASA и имеет международную поддержку [5, 15, 17]. Результатом реанализа, выполняемого в этом проекте, является суточная температура поверхности океана в узлах координатной сетки $0,009^\circ$ (≈ 1 км). Пока такие продукты далеки от совершенства, поэтому в оперативной практике используют главным образом ТПО, восстановленную по ИК-измерениям.

При рассмотрении ИК-диапазона считается, что окно прозрачности атмосферы на длине волны 3,7 мкм является наилучшим для наблюдения за морем. Излучение на этой длине очень чувствительно к изменениям поверхностной температуры. Температура легко измеряется, и окно более чистое, чем на частотах 8,5 и 11 мкм. Но на этой длине волны в суммарное принимаемое излучение существенный вклад вносит отражённая солнечная радиация. Поэтому для вычисления ТПО с использованием измерений на MWIR каналах берутся только ночные витки. Такие продукты называют «ночная ТПО» [2].

Таким образом, регулярные измерения ТПО с достаточным для данной задачи пространственным и временным разрешением в любой точке Мирового океана при отсутствии облачности можно получать в тепловом ИК-диапазоне с приборов, установленных на полярно-орбитальных спутниках. Самой проверенной и востребованной технологией восстановления температуры поверхности океана является метод multi-channel SST, или «расщеплённого окна прозрачности» [3]. В этом методе используются измерения на двух длинах волн теплового ИК-диапазона.

Существуют несколько разновидностей алгоритма [3], но его прообраз, выраженный в соответствующих уравнениях, разработан в начале 80-х годов для радиометра AVHRR/2 [3] и выглядит следующим образом:

$$SST = \alpha_1 + \alpha_2 T_4 + \gamma (T_4 - T_5),$$

где T_4 и T_5 – яркостная температура на соответствующих каналах, а коэффициенты определяются путём сравнения спутниковых температур с температурой, полученной *in situ* (с буёв и судов).

При построении полей ТПО по спутниковым ИК-данным, как правило, вначале применяется процедура фильтрации облачности, для которой используются измерения на других каналах, в том числе в видимом диапазоне. А затем уже рассчитывают попиксельные значения температуры воды. Но облака могут быть не видны алгоритмом фильтрации по двум причинам: если они меньше пространственного разрешения или очень прозрачны, как, например, *alta cirrus*.

Влияние атмосферы сказывается на значении не только ТПО, но и её градиента:

$$\nabla T_0 = t \nabla T_s,$$

где ∇T_s – это температурный контраст, ∇T_0 – это контраст, регистрируемый со спутника и t – прозрачность атмосферы. Параметр t может варьировать в диапазоне 0,4–0,8 [2].

Восходящее инфракрасное и микроволновое излучение формируется тонкой поверхностной плёнкой толщиной менее 1 мм, известной как *скин-слой*. Поэтому температуру моря, восстановленную по спутниковым данным, часто называют *скин-температурой*, а ТПО, полученную *in situ* – *балк-температурой* (*bulk*). В условиях ветро-волнового перемешивания в океане формируется верхний однородный слой. Поскольку в модификациях мультиканального алгоритма расчёта ТПО коэффициенты настраиваются по измерениям с буёв и проходящих судов, считается, что алгоритм multi-channel SST характеризует температуру воды в среднем на глубине 0,5–2,0 м (примерный диапазон расположения термодатчиков на буях и судах 0,1–5,0 м [4]). В безоблачную штилевую погоду днём происходит сильный нагрев поверхностного слоя океана, а ночью за счёт радиационного выхолаживания – охлаждение. При сильном дневном прогреве в результате испарения *скин-слой* становится холоднее нижерасположенных вод.

Ошибки определения температуры воды по указанному алгоритму с использованием измерений радиометров AVVHR/3, установленных на метеорологических спутниках серии NOAA, оценивают в 0,3–0,5° [5].

В ходе выполнения данной работы были использованы ИК-измерения радиометров AVHRR/3, поступающие со спутников серии NOAA. В настоящее время на орбите функционируют спутники NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19, NOAA-20 и Suomi/NPP. За сутки навигационный район покрывается целиком, как правило, 6 раз тремя спутниками – ночным и дневными витками каждого аппарата. Время пролётов по Владивостокскому времени в районе 5, 7, 9 и 17, 19, 21 часов соответственно для спутников NOAA-19, 15, 18. Поскольку спутники работают на солнечно-синхронных орбитах, время съёмки по местному времени будет примерно одно и то же для любой акватории.

Спутники серии NOAA являются «метеорологическими», поэтому принимать информацию, полученную приборами, на них размещёнными, можно свободно, без существенных ограничений. Вся техническая документация, необходимая для получения и обработки данных (включая калибровочные коэффициенты), находится в свободном доступе.

Для получения полей скорости звука на основе спутниковых данных по температуре также необходимо иметь данные по солёности, что позволяет выполнять расчет по формулам TEOS-10 [6]. Для этого нами был предложен метод согласования данных, полученных со спутников, и расчетных данных гибридной гидродинамической модели. В качестве такой модели, удовлетворяющей нас по пространственно-временному разрешению, была выбрана гидродинамическая модель NEMO [7–10].

Как модель, использующая ассимилированные данные, модель NEMO позволяет вычислять и прогнозировать состояние гидрологических характеристик, которые могут соответствовать присутствующим на полигоне условиям в момент проведения экспериментов.

Данная модель позволяет получать ежедневный прогноз по гидрологическим характеристикам на период до 10 дней с момента выдачи прогноза по всему земному шару на сетке с разрешением до 8 км (0.0083° на сетке, или ~30 секунд). На основе модельных данных были получены характеристики температуры и солёности, а затем, на основании этих данных, были получены скорости звука на полигоне для трасс излучения по известным гидродинамическим уравнениям [11–13]. Согласно документации модели (Quality Information Document (QUID), документу о соответствии качества CMEMS_GLO_QUID_001_024 [14], прогнозы температуры и солёности для диагностических данных находятся в пределах, указанных в табл. 1.

Таблица 1. Несоответствия температуры и солёности по отношению к наблюдаемым данным (наблюдение–модель) для версии модели 2.3 по значениям средних среднеквадратических отклонений (северная часть Тихого океана, окраинные моря)

Глубина (слой), м	Температура, °K		Солёность, ‰	
	среднее	ср.кв. откл.	среднее	ср.кв. откл.
0–5	-0.06	0.63	0.015	0.201
5–100	-0.02	0.98	0.003	0.168
100–300	-0.03	0.83	0.000	0.091
300–800	-0.02	0.36	0.000	0.037

В целом, по заявлению авторов, отклонения от измерений *in situ* не превышают 0.5°K по температуре и 0.1 ‰ по солёности. В термоклине ошибки могут достигать 1 K и 0.2 ‰ соответственно. Модельные данные разделены на 50 дискретных вертикальных слоев от 1 м у поверхности до 450 м от дна и 22 слоев на уровне выше 100 м. Имеется возможность самостоятельного изменения количества слоев и ввода своих данных. Параметризация «частичных ячеек» [15] выбрана для лучшего представления топографического дна [11], при этом показатель адвекции импульса рассчитывается из схемы сохранения энергии и энтропии, предложенной Аракава [4] и Ламб [11]. Расчет трассеров (температуры и солёности) выполняется по схеме полного исчезновения дисперсии (*total variance diminishing, TVD*) адвекции [15].

Выполненная нами экспериментальная работа относится к району залива Петра Великого в Японском море (по большей части, но и включая часть Центральной котловины до возвышенности Ямато, т.е. северо-западную часть Японского моря), для которого характерен субтропический и субарктический тип климата с присущими для них особенностями распределения температуры и солёности, глубины залегания ПЗК. Данный район подвержен действию муссонов, что означает разделение типов погодных условий на зимний (холодный) и летний (теплый) периоды года с взаимнообратным действием ветрового воздействия в районе разветвления системы. В холодный период года, в связи с выхолаживанием и отсутствием термоклина, поле температуры и скорости звука достаточно точно определяется вплоть до глубины залегания ПЗК методами контактного и дистанционного зондирования. Летом же, в связи с развитием сезонного термоклина в верхнем подповерхностном слое соленых вод, а также в связи с уменьшением количества безоблачных дней, необходимых для спутниковой съёмки в ИК-диапазоне поверхности моря, точность определения скорости звука в верхнем слое вод Японского и Охотского морей

уменьшаются, что требует отдельного рассмотрения возможностей коррекции ошибок в теплый сезон.

2. Оценка возможностей снижения ошибки позиционирования и основных факторов влияния

Пространственно-временное разрешение данных реанализа модели NEMO для Японского моря может учитывать среднесуточные характеристики на сетке с разрешением до 8 км. При этом спутниковый снимок температуры поверхности моря (ТПМ) фиксирует изменчивость на момент прохождения спутника за минимальный интервал времени, требуемый для выполнения снимка. Таким образом, при более низком влиянии на оценку скорости звука значений поля солёности можно получить более точную оценку за счет комбинирования полей реанализа модели NEMO по солёности со спутниковым снимком ТПМ. Следует отметить, что такая оценка будет максимально точна для северо-западной части Японского моря в холодный период года. В это время влияние термоклина на глубину залегания ПЗК минимально. Более подробно о достижимой возможности снижения погрешностей показано в разделах 3 и 4 данной статьи. Пример поля ТПМ, восстановленного по данным спутников NOAA, приведен на рис. 1.

3. Алгоритм снижения ошибки позиционирования

Снижение ошибки определения скорости звука может быть выполнено на основе выделения основных особенностей среды, в которых происходит распространение излучения. В данном случае, согласно информации об уравнении состояния морской воды [6], а также исходя из теории погрешности измерений, суммарная ошибка определения скорости звука будет находиться по следующей формуле:

$$C = C_0 + \alpha T + \beta S + \gamma P \rightarrow C = C_0 + \alpha T + \beta S + \gamma P, \quad (1)$$

где C_0 – истинное значение скорости звука, α – коэффициент пропорциональности воздействия значения температуры на скорость звука, β – коэффициент пропорциональности воздействия значения солёности на скорость звука и γ – коэффициент пропорциональности воздействия значения давления на скорость звука. Предполагается, что звук распространяется в подводном звуковом канале (ПЗК) в виде лучей, которые за счет рефракции, отражаясь от поверхности и дна, стремятся к оси ПЗК. Коэффициентом γ можно пренебречь, так как в холодное время года звуковые лучи могут проходить от поверхности до дна, что делает данный компонент ошибки либо сложно вычисляемым, либо суммарно равным нулю.

Карта ТПО в Японском море по данным спутника NOAA

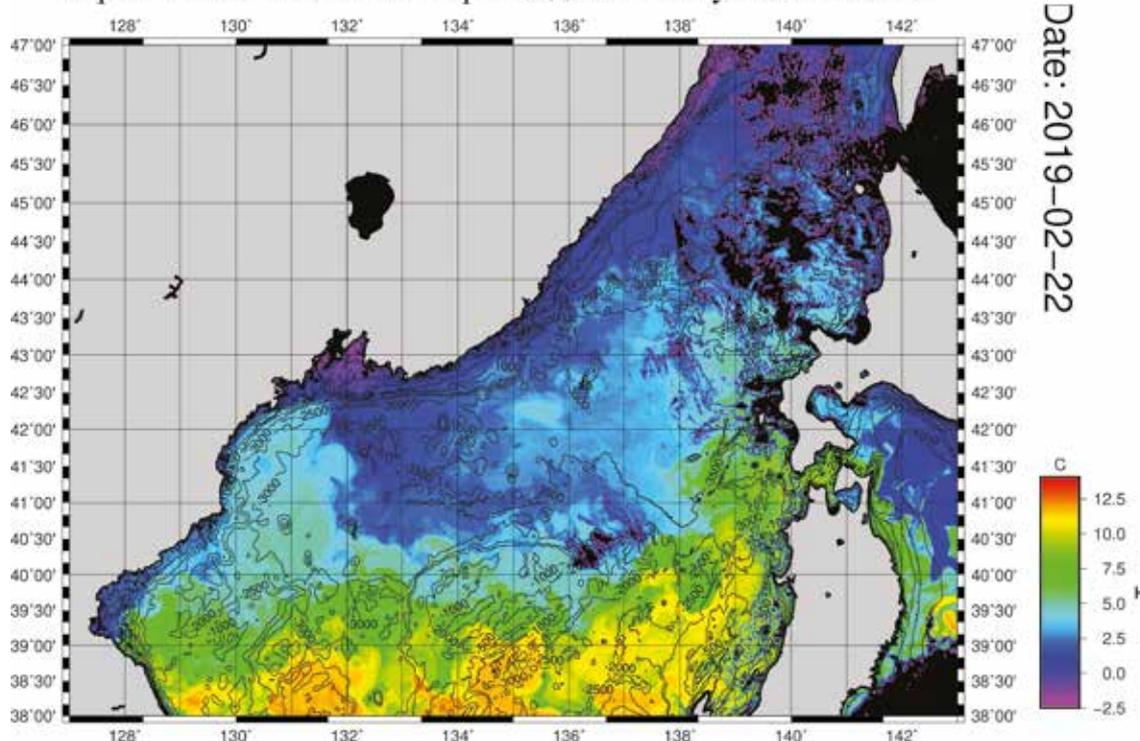


Рис. 1. Температура поверхности моря, восстановленная по измерениям радиометра AVHRR со спутника NOAA 22 февраля 2019 г. 10:14 Влд.

Таким образом, значимые погрешности возникают из-за изменений температуры и солености в пределах расстояний, на которых находятся приемник и излучатель. Основываясь на ранее проведенных экспериментах, подробно изложенных в [1, 17], полагаем, что для характеристики скорости в ПЗК возможно использование спутниковых данных высокого разрешения. Может быть использован поверхностный скин-слой, в котором измеряется температура. Это справедливо для холодного периода года, когда при эксперименте в границах исследуемого полигона термоклин фактически отсутствует. Из данных гибридной гидродинамической модели NEMO используется слой глубиной 0.5 м как наиболее близкий к получаемому на основе спутниковых данных. В показанной на рис. 1 области Японского моря для гидрологических полей в данных пределах имеем следующие величины параметров (на 22 февраля 2019 г.):

$$\Delta T = \{-1,7 \div 6,7^{\circ}\text{C}\}, \Delta S = \{32 \div 35\text{‰}\}, \Delta P = \{0 \div 350\text{dBar}\}. \quad (2)$$

Температура обусловлена зимним периодом и наличием льда в акватории [18]. Для определения того, как коэффициенты α и β влияют на изменения скорости звука, нам достаточно построить несколько решений для уравнений скорости звука в морской воде [6] и на основании полученных решений определить величины влияния этих коэффициентов. На рис. 2 выполнено построение кривых зависимости скорости звука от температуры при различных значениях солености (4 диапазона, 32–35).

В результате проведенных экспериментов установлено, что, к примеру, при солености в 34 ‰, любое изменение солености на 1 ‰ приведет к изменению скорости звука 1.364 м/с. При этом изменение температуры на 1 °C приведет к изменению скорости на 4.358 м/с. Таким образом, влияние температуры на скорость звука примерно в 3 раза выше, чем солености. Данные результаты исследований идентичны полученным в летнее время в результате экспериментов [19] и показывают, что характер соотношений примерно одинаков независимо от времени года и соотношения параметров. Таким образом, в нашем случае можно считать, что главными факторами, определяющим изменчивость скорости звука, являются температурные аномалии, поэтому, для восстановления горизонтальных полей скорости звука возможно использование более точных данных по температуре совместно с менее точными данными по солености – более низкого разрешения и с большей ошибкой. Более подробно о том, насколько

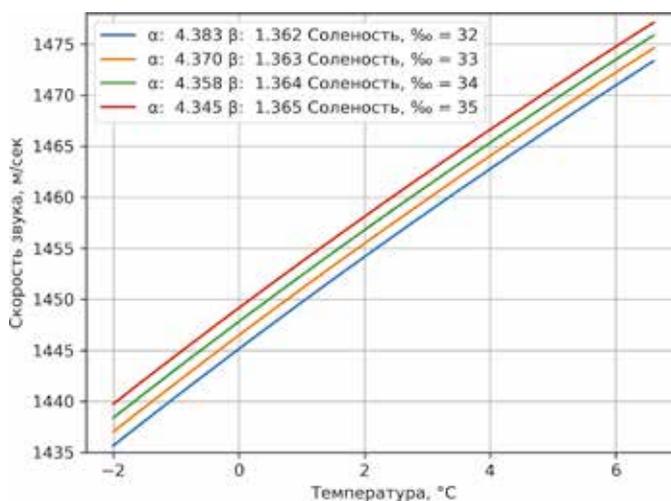


Рис. 2. Зависимость скорости звука от температуры при различных значениях солености и расчетные коэффициенты влияния α и β

ко такой подход может повлиять на точность оценок при позиционировании, будет показано в разделе 4.

Сами коэффициенты α и β определяются на основании формул:

$$\beta = \frac{\Delta C}{\Delta S} = \left[\frac{\text{м / сек}}{\text{‰}} \right], \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\Delta C}{\Delta T} = \left[\frac{\text{м / сек}}{\text{°C}} \right], \quad (4)$$

исходя из соотношений, указанных на рис. 2.

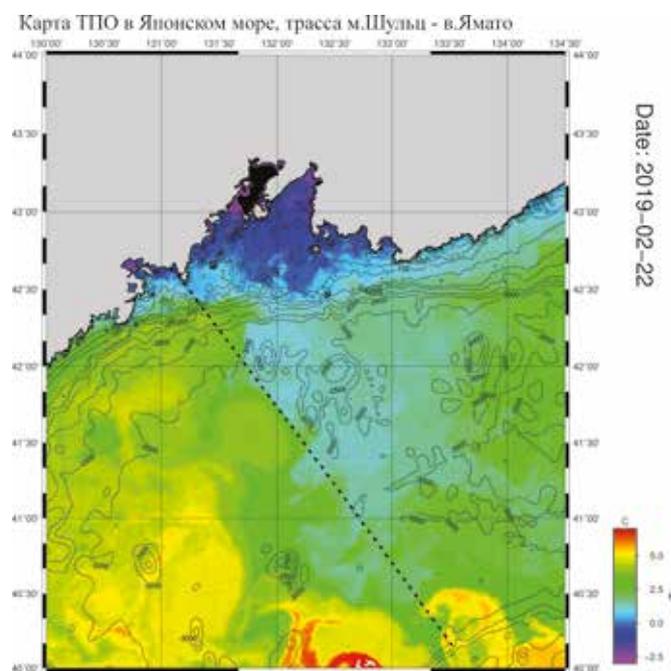


Рис. 3. Температура поверхности моря по данным спутника NOAA за 22 февраля 2019 г. Трасса м. Шульц – возв. Ямато показана черной пунктирной линией

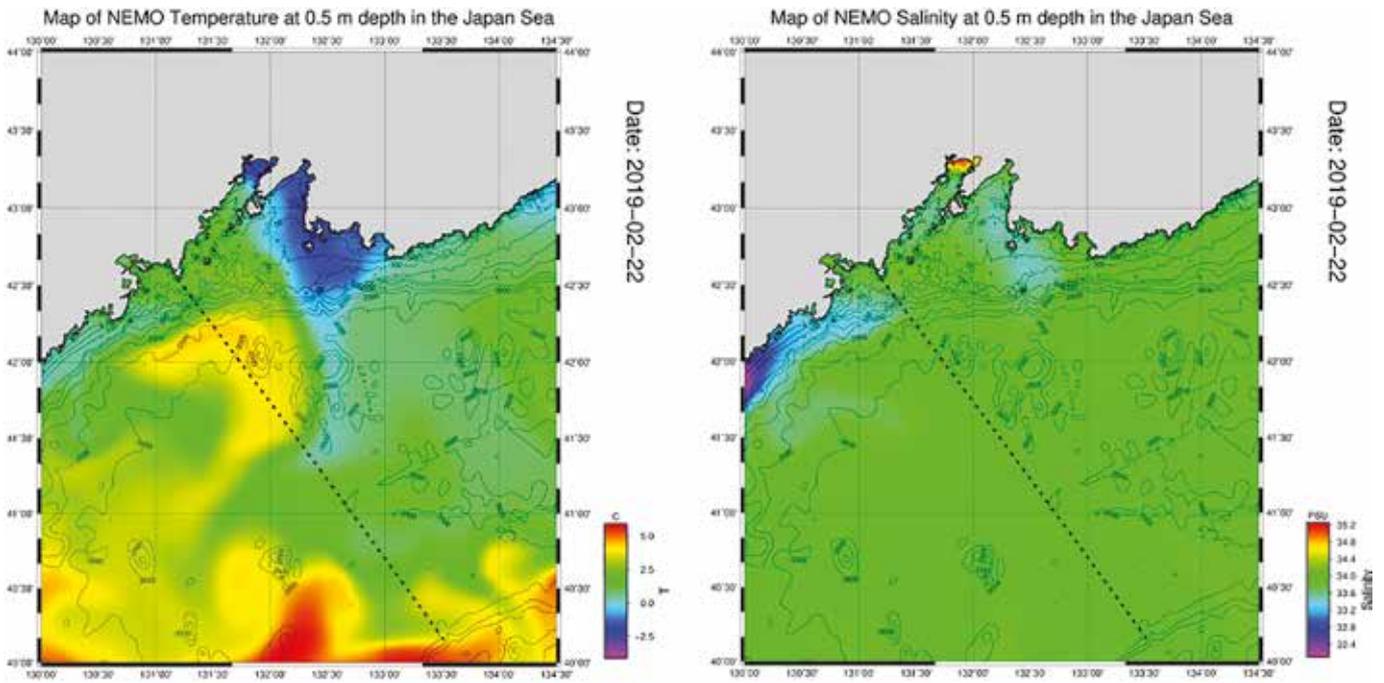


Рис. 4. Термохалинные характеристики верхнего слоя воды 0.5 м согласно данным модели NEMO для температуры (а) и солёности (б) за 22 февраля 2019 г.

Анализ результативности метода для типичных условий холодного времени года был выполнен на трассе м. Шульца – возв. Ямато по данным за 22 февраля 2019 года. Температура, зафиксированная по спутниковым данным для этого дня, приведена на рис. 3.

Затем по модельным данным NEMO были определены суточные средние значения температуры и солёности для данного региона (рис. 3). На рис. 4 показаны поля температуры и солёности для данного района.

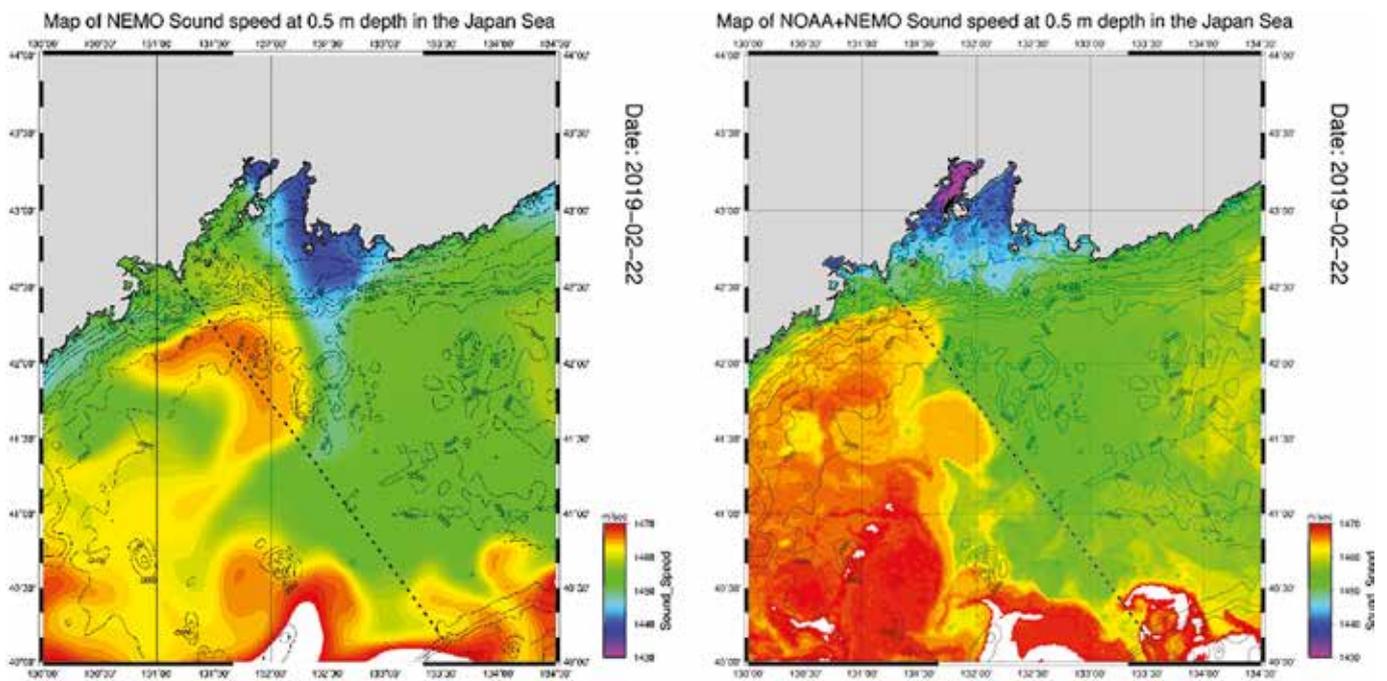


Рис. 5. Поверхностные поля скорости звука по данным NEMO (а) и гибридного происхождения NEMO+NOAA (б) за 22 февраля 2019 г.

Учитывая то, что менее точное определение солености может меньше влиять на точное вычисление скорости звука, нежели температура, представляется разумным для целей повышения точности позиционирования использовать гибридный поля солености модели NEMO и поверхностной температуры спутника NOAA в случаях, когда это возможно по погодным и техническим соображениям. Такой подход показан на рис. 5, где для сравнения даны поля скорости звука в поверхностном слое, полученные по данным NEMO и NEMO+спутник NOAA.

Согласно рис. 4, а очевидно, что гибридные данные позволяют точнее выделять аномалии скорости звука, возникающие в пределах акустической трассы и могущие влиять на изменение скорости звука.

4. Общие замечания по применению метода

Согласно полученным данным профиль скорости звука, определенный по более точным данным, за которые в эксперименте приняты гибридные данные NOAA+NEMO, отличается в среднем от модельных данных по трассе в 330 км на 0,93 м/с. Таким образом, при наличии достаточно качественного спутникового изображения температуры и модельных данных по солености существует теоретическая

Скорость звука на трассе Шульц–Ямато
Дата: 2019-02-22

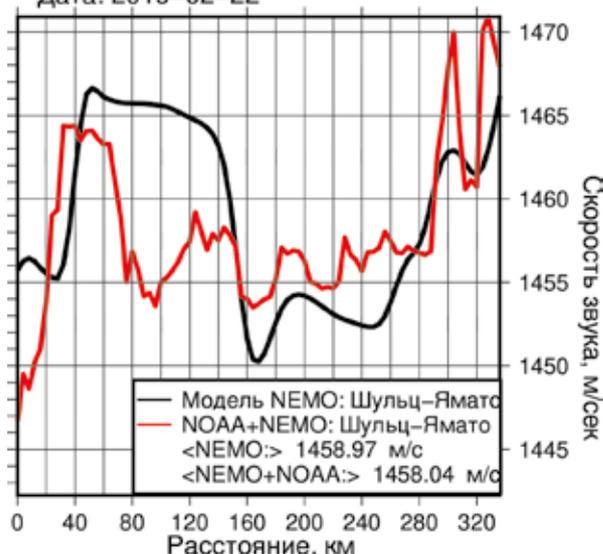


Рис. 6. Профили скорости звука вдоль трассы м.Шульца – возв. Ямато за 22 февраля 2019 г. по данным модели NEMO (черная кривая, Модель NEMO) и по гибридным данным спутников NOAA и модели NEMO (красная кривая, NEMO+NOAA)

возможность улучшения точности не менее чем на 0,95 м/с на 300 км для позиционирования АНПА в холодный период года на акватории, где выполняется миссия АНПА. Профили скоростей, которые можно

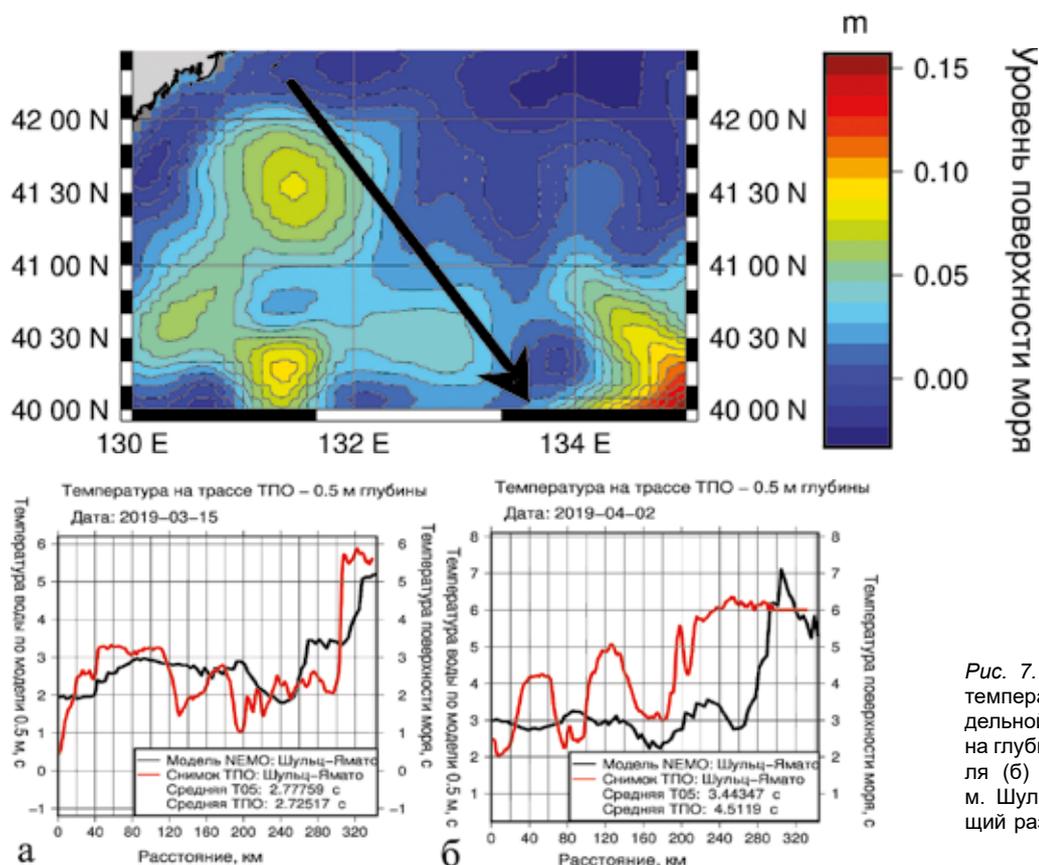


Рис. 7. Сравнение данных спутниковой температуры поверхности моря и модельной приповерхностной температуры на глубине 0.5 м за 15 марта (а) и 2 апреля (б) 2019 г. по акустической трассе м. Шульца – возв. Ямато. Соответствующий разрез и его направление показаны черной стрелкой

Рис. 8. Сравнение данных спутниковой температуры поверхности моря и модельной приповерхностной температуры на глубине 0.5 м за 15 марта (а) и 2 апреля (б) 2019 г. по акустической трассе м. Островной – возв. Ямато. Соответствующий разрез и его направление показаны черной стрелкой

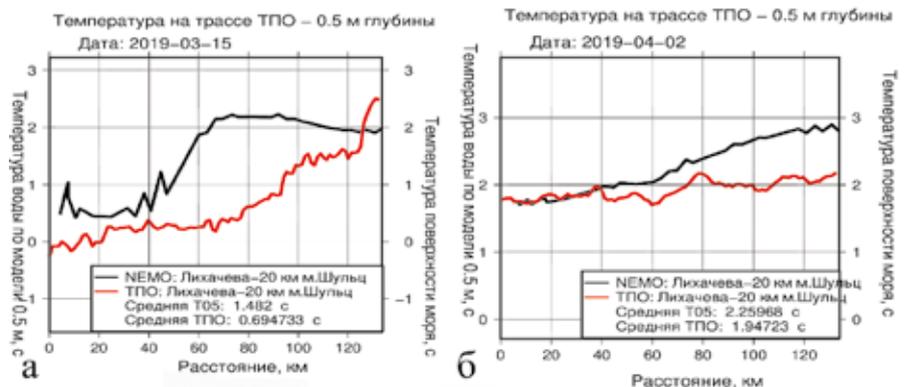
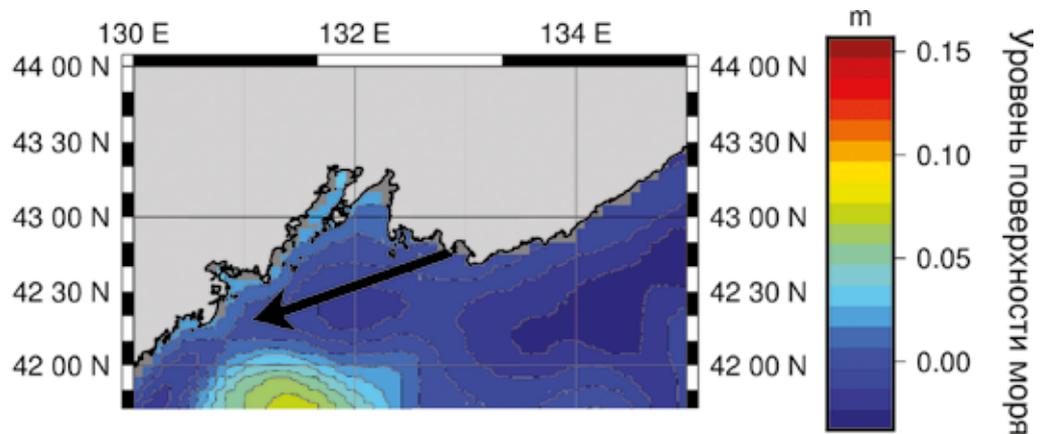
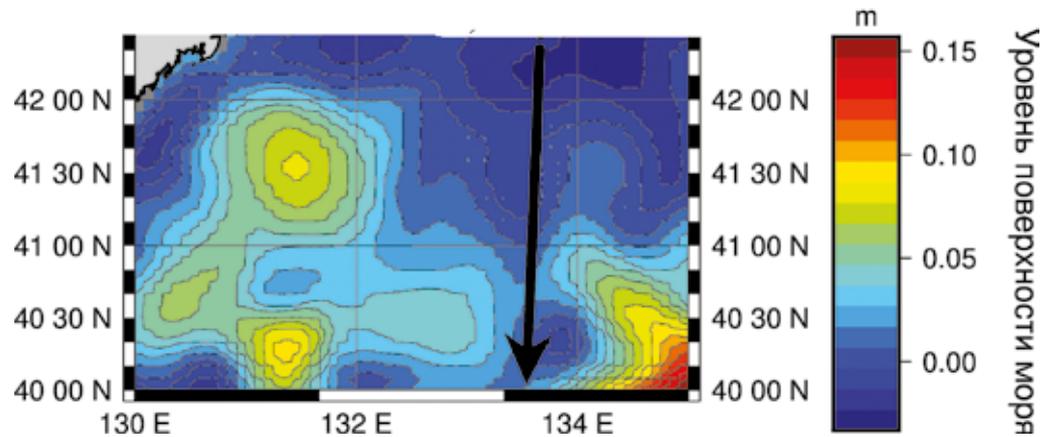
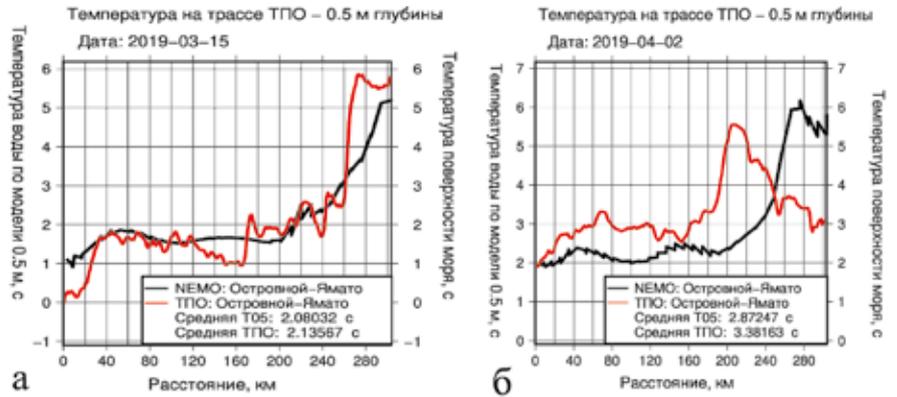


Рис. 9. Сравнение данных спутниковой температуры поверхности моря и модельной приповерхностной температуры на глубине 0.5 м за 15 марта (а) и 2 апреля (б) 2019 г. по акустической трассе м. Лихачева – м. Шульца. Соответствующий разрез и его направление показаны черной стрелкой

получить на основе данных модели NEMO и по гибридным данным, показаны на рис. 6.

Для выяснения возможных пределов применения методики была проведена серия экспериментов, в которых сравнивалась температура, полученная по спутниковым данным, и модельная на глубине 0,5 м на границе теплого и холодного сезона (до и после возникновения термоклина). Данные до возникновения термоклина – за 15 марта 2019 г., после возникновения – за 2 апреля 2019 г. Использовались несколько трасс, основные из которых приведены на рис. 7–10. Данные трассы находятся как в шельфовой зоне залива Петра Великого вдоль и поперек шельфа, так и распространяются через Центральную котловину до возвышенности Ямато, что в совокупности позволяет получить более репрезентативную выборку для анализа результатов использования метода в северо-западной части Японского моря на трассах с различными характеристиками по скорости звука и расстоянию приема и передачи сигналов.

Разность температур (в 80 % случаев) в оценках по трассе варьируется в пределах от 0,1 до 0,7 градусов Цельсия, что может быть вызвано причинами, связанными с погодными условиями и различным характером формирования сравниваемых характери-

стик. Для определения возможной ошибки позиционирования объекта (например, АНПА) при нашем методе необходимо знать скорость звука и ошибку, с которой она определяется на акустической трассе. Использование гибридной оценки скорости звука, составленной на основе спутниковой ТПМ и модельной солёности, позволяет нам вывести среднеквадратическую ошибку определения скорости звука за счет ее сравнения с данными модели, имеющими более грубое временное разрешение. Согласно исследованным зависимостям, это соответствует изменению скорости звука в пределах 0,43–3,05 м/с на 230 км (устранение ошибки в диапазоне 65,93–467,67 м в позиционировании объекта) или 0,19–1,32 м/с на 100 км (устранение ошибки в диапазоне 12,67–88 м в позиционировании объекта). Данные экспериментов сведены в табл. 2.

Таблица 2. Возможности снижения ошибки при корректировке данных по скорости звука комбинированным методом

Дистанция, км	Скорость звука, м/с (корректировка)	Снижение ошибки позиционирования, м
100	0,19 – 1,32	12,67 – 88
230	0,43 – 3,05	65,93 – 467,67

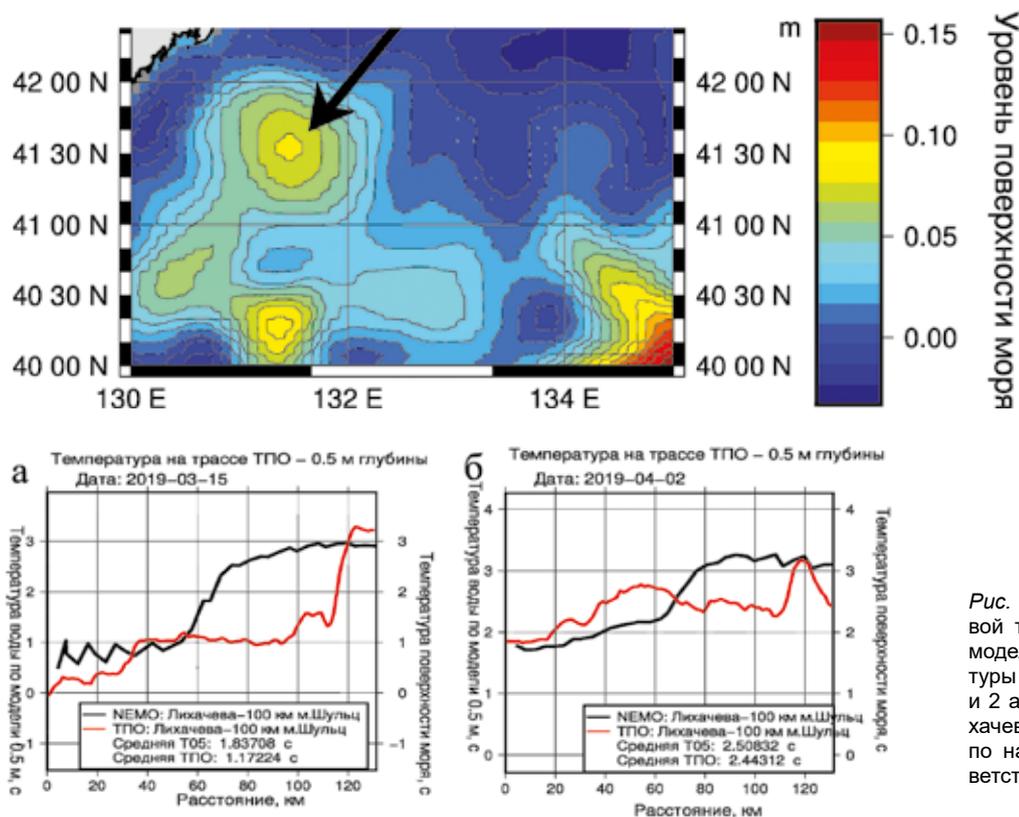


Рис. 10. Сравнение данных спутниковой температуры поверхности моря и модельной приповерхностной температуры на глубине 0,5 м за 15 марта (а) и 2 апреля (б) 2019 г. по трассе м. Лихачева – точка в 100 км от м. Шульца по направлению к возв. Ямато. Соответствующий разрез и его направление показаны черной стрелкой

Таким образом, метод совместного использования спутниковых снимков видимого диапазона и данных гибридной гидродинамической модели NEMO в холодный период года позволяет снижать ошибку определения скорости звука для данного региона Японского моря в сложных случаях при наличии мезомасштабных вихревых образований.

На сегодняшний момент остается открытым вопрос по улучшению метода снижения ошибки в летний период. Для решения этого вопроса предполагается в дальнейшем провести исследование совместного использования дополнительных данных от разных гидродинамических моделей, использующих данные реанализа и спутниковую информацию для построения характеристик водных масс.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Голов А.А., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С., Тагильцев А.А. Особенности формирования интерференционной структуры скалярно-векторных звуковых полей на шельфе Японского моря // Доклады академии наук. 2018. 480. С. 1–4.
2. Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д. Морские наблюдательные системы как составная часть оперативной океанологии (обзор) // Метеорология и гидрология. 2018. 12. С. 5–30.
3. Моргунов Ю. Н., Безответных В. В., Буренин А. В., Войтенко Е. А., Голов А. А. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. 2018. 64. С. 191–196.
4. Arakawa A., Lamb V.R. A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations // Mon. Weather Rev. 1981. Vol. 109. P. 18–36. – <https://www.aos.wisc.edu/~aos718/arakawaandlamb80.pdf>
5. Barton I.J., Prata A.J. Satellite derived sea surface temperature data sets for climate applications // Adv. in Space Res. 1995. 16(10). P. 127–136.
6. Gilles G., Aksenov Y., Blockley E., Chevallier M., Feltham D., Fichefet Th., Holland P., Iovino D., Madec G., Massonnet F., Ridley J., Rousset C., Salas D., Schroeder D., Tietsche St., Vancoppenolle M. N. S. (2018). Sea Ice modelling Integrated Initiative (SI³) – The NEMO Sea Ice engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.1471689. – https://forge.ipsl.jussieu.fr/nemo/chrome/site/doc/SI3/manual/pdf/SI3_manual.pdf
7. Aumont O., Éthé Ch, Lovato T., Mouchet A., Nurser G., Palmiéri J., Yool A. N.E.M.O. T.O.P. Working. Tracers in Ocean Paradigm (TOP) – The NEMO Tracers engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Zenodo. 2019. doi:10.5281/zenodo.1471700. – https://forge.ipsl.jussieu.fr/nemo/chrome/site/doc/TOP/manual/pdf/TOP_manual.pdf
8. Gurvan M., Bourdallé-Badie R., Chanut J., Clementi E., Coward A., Éthé, Samson, G. NEMO ocean engine. NEMO ocean engine. Zenodo. 2019. doi:10.5281/zenodo.3878122. – <https://zenodo.org/record/1472492>
9. Haidvogel D.B., Beckman A. Numerical ocean circulation modeling. London: Imperial College Press, 1999. 320 p.
10. IAPWS. Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific use. Doorwerth. Netherlands: The International Association for the Properties of Water and Steam, 2009.
11. IAWPS. Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Thermodynamics Properties of Seawater. Berlin: The International Association for the Properties of Water and Steam, 2008.
12. Lellouche J-M., Legalloudec O., Regnier C., Levier B., Greiner E., Drevillon M. NEMO Quality Information Document CMEMS_GLO_QUID_001_024. Toulouse: COPERNICUS Marine Environment Monitoring Service. – <http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf> 2019.
13. Kosheleva, A., Lazaryuk, Y., Yaroshchuk, I. Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone // Vol. 24. P. 005001. 2015. doi:10.1121/2.0000109. – <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/2.0000109>
14. Lévy M., Estublier A., Madec G. Choice of an advection scheme for biogeochemical models // Geophys. Res. 2001. Lett., 3725–3728. doi:10.1020/2001GL012947
15. McClain E.P., Pichel W.G., Walton C.C. Comparative performance of AVHRR based multichannel sea surface temperatures // J. Geophys. Res., 1985. 90, 11587–11601.
16. Millero F.J., Feistel R., Wright D.G., McDougall T.J. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale // Deep-Sea Res. I, 2008. 55, 50–72.
17. Steward R.H. Methods of satellite oceanography. University of California press, 1985.
18. Bourdallé-Badie R., Bell M., Chanut J., Clementi E., Coward A., Drudi M., Éthé Ch., Iovino D., Lea D., Lévy C., Madec G., Martin N., Masson S., Mathiot P., Mocavero S., Müller S., Nurser G., Samson G., Storkey D. N.E.M.O. System NEMO ocean engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) // 2017. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.1464816. – https://forge.ipsl.jussieu.fr/nemo/chrome/site/doc/NEMO/manual/pdf/NEMO_manual.pdf

Об авторах

КАПЛУНЕНКО Дмитрий Дмитриевич, к.г.н., старший научный сотрудник лаборатории физической океанологии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: геофизическая гидродинамика, моделирование глобальной циркуляции, дальневосточные моря России
Тел.: +7 (423) 231-3087, факс +7 (423) 231-2573
E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

ДУБИНА Вячеслав Анатольевич, к.г.н., заведующий лабораторией ледовых исследований
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: физическая океанография, дистанционное зондирование земли
Тел.: +7 (423) 234-0873, факс +7 (423) 231-2573
E-mail: dubina@poi.dvo.ru

МОРГУНОВ Юрий Николаевич, д.т.н., заведующий отделом гидроакустики и технический средств исследования океана, заведующий лабораторией акустической томографии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика, гидрофизика
Тел.: +7 (423) 231-1631, факс +7 (423) 231-2573
E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

ГОЛОВ Александр Александрович, к.т.н., научный сотрудник лаборатории акустической томографии
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустическая томография, гидроакустика, звукоподводная связь, подводная навигация
Тел.: +7 (423) 231-1631, факс +7 (423) 231-2573
E-mail: golov_alexander@inbox.ru

Для цитирования:

Каплуненко Д.Д., Дубина В.А., Моргунов Ю.Н., Голов А.А. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В ЯПОНСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ // Подводные исследования и робототехника. 2021. №. 2(36). С. 28–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_03.



THE AUGMENTATION OF HORIZONTAL FIELDS OF SOUND SPEED IN THE SEA OF JAPAN USING SATELLITE DATA

D.D. Kaplunenko, V.A. Dubina, Yu.N. Morgunov, A.A. Golov

The accessing of maximal precise values of horizontal and vertical sound speed within marine basins for accurate positioning of unmanned underwater vehicles inside the water column is one of the major tasks for a couple of related fields of marine sciences – underwater acoustics, satellite, and common oceanology. Meanwhile, resolving this task is possible mainly by the indirect way, using the water temperature and salinity data acquired by remote sensing methods and by *in situ* measurements with the consequent modeling and data augmentation. This work presents the algorithm of augmentation of horizontal fields of sound speed with the spatial resolution of about 1 km based on satellite observations in the infrared and visible range together with the data of hydrodynamic modeling in the north-western part of the sea of Japan with the inclusion of the Peter the Great Bay and frontal area of separation of currents system nearby of the Yamato rise. According to the calculation results, impact assessment of temperature and salinity on sound speed has been made for their real values observed within the mentioned region area. Finally, this experiment allows assessing the possible decreasing of an underwater vehicle positioning error due to the co-utilization of mentioned data types. This augmentation method of sound speed is applicable for the wintertime, during the absence of seasonal thermocline.

Keywords: The sea of Japan, satellite data, sound speed fields, sound speed correction, radiometer NOAA AVHRR/3, hydrodynamic model NEMO.

References

1. Akulichev, V.A.; Bezotvetnykh, V.V.; Burenin, A.V.; Voytenko, E.A.; Golov, A.A.; Morgunov, Y.N.; Strobyskin, D.S.; Tagiltsev, A.A. Peculiarities of the formation of the interference structure of scalar-vector acoustic fields on the shelf of the Sea of Japan. *Doklady earth sciences*. 2018. 480. Vol. 2. P. 796–799.
2. Zelenko, A.A.; Resnyanskii, Yu.D. Marine Observational Systems as an Integral Part of Operational Oceanology: A Review. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2018. 12, P. 797–814.
3. Morgunov, Yu.N.; Bezotvetnykh, V.V.; Burenin, A.V.; Voytenko, E.A.; Golov, A.A. Eksperimental'noe testirovanie tekhnologii vysokotochnoj podvodnoj akusticheskoi dal'nometrii. *Akusticheskij zhurnal*. 2018. 64, 2. P. 191–196.
4. Arakawa, A. and Lamb, V. R.A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations. *Mon. Weather. Rev.* 1981. 109, 18–36.
5. Barton, I.J.; Prata, A.J. Satellite derived sea surface temperature data sets for climate applications. *Adv. in Space Res.* 1995. 16(10), 127–136.
6. Group, N. S. (2018). Sea Ice modelling Integrated Initiative (SI³) – The NEMO Sea Ice engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Zenodo. doi:10.5281/zenodo.1471689.
7. Group, N.E.M.O. T.O.P. Working. Tracers in Ocean Paradigm (TOP) – The NEMO Tracers engine. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Zenodo. 2019. doi:10.5281/zenodo.1471700.
8. Gurvan, M.; Bourdallé-Badie, R.; Chanut, J.; Clementi, E.; Coward, A.; Ethé, Samson, G. NEMO ocean engine. NEMO ocean engine. Zenodo. 2019. doi:10.5281/zenodo.3878122.
9. Haidvogel, D.B.; Beckman, A. Numerical ocean circulation modeling. London: Imperial College Press. 1999. 320 p.
10. IAPWS. *Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific use*. Doorwerth. Netherlands: The International Association for the Properties of Water and Steam. 2009.
11. IAWPS. *Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Thermodynamic Properties of Seawater*. Berlin: The International Association for the Properties of Water and Steam. 2008.
12. Lellouche, J.-M.; Legalloudec, O.; Regnier, C.; Levier, B.; Greiner, E.; Drevillon, M. *NEMO Quality Information Document CMEMS_GLO_QUID_001_024*. Toulouse: COPERNICUS Marine Environment Monitoring Service. Получено из <http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf> 2019.
13. Kosheleva, A.; Lazaryuk, Y.; Yaroshchuk, I. Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone. // 24, стр. 005001. 2015. doi:10.1121/2.0000109
14. Lévy, M.; Estublier, A.; Madec, G. Choice of an advection scheme for biogeochemical models. *Geophys. Res. Lett.*, 3725–3728. doi:10.1029/2001GL012947
15. McClain, E.P.; Pichel, W.G.; Walton, C.C. Comparative performance of AVHRR based multichannel sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.*, 1985. 90, 11587–11601.
16. Millero, F.J.; Feistel R.; Wright D.G.; McDougall T.J.. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep-Sea Res. I*, 2008. 55, 50–72.
17. Steward, R. H. *Methods of satellite oceanography*. / USA: University of California press. 1985.
18. Team, N.E.M.O. System *NEMO ocean engine*. Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). 2017. Zenodo. doi:10.5281/zenodo.1464816

About the authors

KAPLUNENKO Dmitry Dmitrievich, PhD, senior research scientist

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: geophysical fluid dynamics, global circulation modelling, Russian Far East seas

Phone: +7 (423) 231-3087, fax: +7 (423) 231-2573

E-mail: dimkap@poi.dvo.ru

DUBINA Vyacheslav Anatolievich, PhD, head of laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: ocean acoustics, partial differential equations, math modelling, parabolic equation method

Phone: +7 (423) 234-0873, fax: +7 (423) 231-2573

E-mail: dubina@poi.dvo.ru

MORGUNOV Yuri Nikolaevich, Doctor of Science, head of laboratory

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: ocean acoustics, acoustic navigation, acoustic ranging, underwater acoustic communication, acoustic tomography

Phone: +7 (423) 231-1631, fax: +7 (423) 231-2573

E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

GOLOV Aleksander Aleksandrovich, PhD, senior research scientist

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia

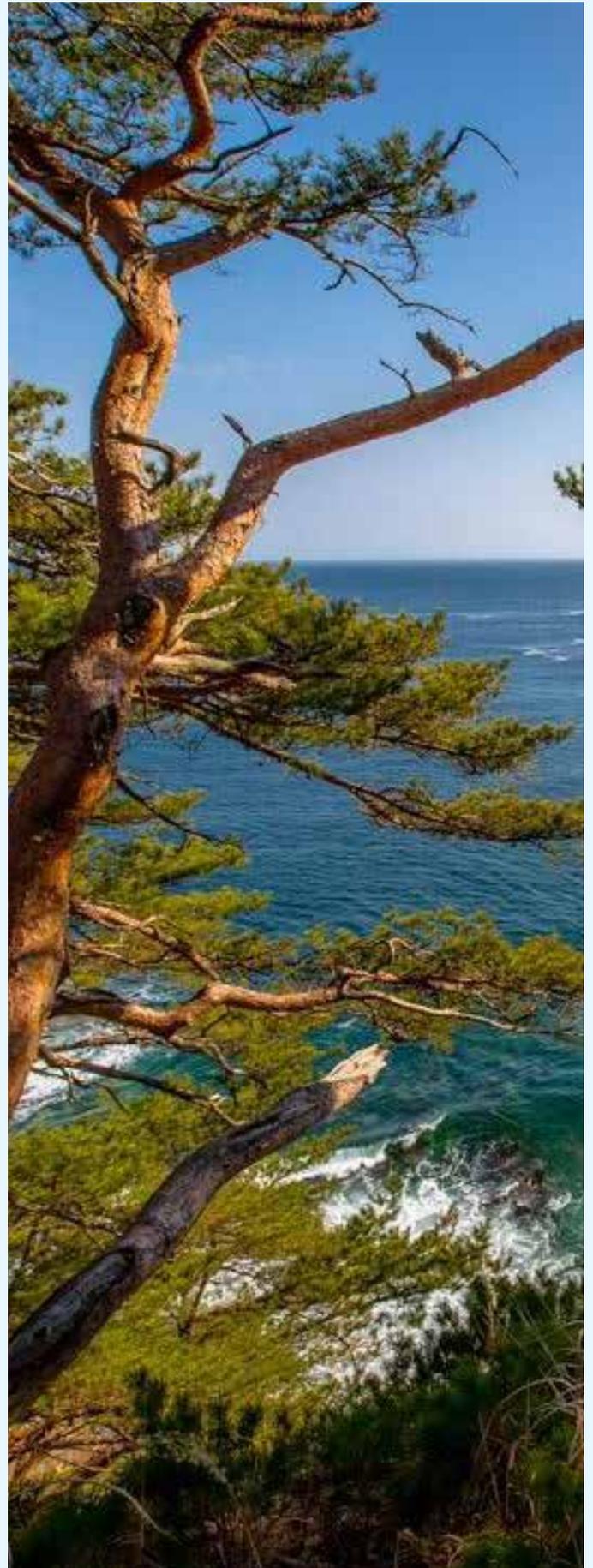
Research interests: Acoustic tomography, hydroacoustic, underwater communications, underwater positioning

Phone: +7 (423) 231-1631, fax: +7 (423) 231-2573

E-mail: golov_alexander@inbox.ru

Recommended citation:

Kaplunenko D.D., Dubina V.A., Morgunov Yu.N., Golov A.A. The augmentation of horizontal fields of sound speed in the Sea of Japan using satellite data. Underwater investigation and robotics. 2021. No. 2(36). P. 28–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_03.



ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ПОИСКА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В МОРСКОМ ДНЕ

Б.А. Касаткин, Г.В. Косарев

Анализируется опыт применения акустического профилографа с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала, размещенного на борту автономного необитаемого подводного аппарата и предназначенного для поиска малоразмерных объектов в верхнем слое морского дна. Для увеличения разрешающей способности профилографа использованы алгоритмы синтеза апертуры. Описана методика проведения профилографической съемки морского дна. Выполнена оценка размеров обнаруженных целей при помощи алгоритма синтеза апертуры. Произведен расчет производительности профилографической съемки с учетом времени обследования заданной площади и затрат на первичную и вторичную обработку полученных данных.

Ключевые слова: акустический профилограф, профилирование морского дна, метод синтеза апертуры, автономный необитаемый подводный аппарат, алгоритм синтеза апертуры.

Введение

Одним из важных применений акустического профилографа (АП), помимо изучения геологической структуры морского дна, является поиск и обнаружение малоразмерных объектов, в том числе и потенциально опасных, в толще дна. Эта проблема особенно актуальна при использовании АП для поиска и обнаружения заиленных донных мин, а также мин, самозакапывающихся в морской грунт.

Использование АП в составе бортовой аппаратуры автономного необитаемого аппарата (АНПА) позволяет заглубить антенну АП на оптимальную высоту над дном (уменьшить энергетические потери на пространственное расхождение фронта сферической волны, уменьшить влияние реверберации). Кроме того, при размещении АП на борту АНПА можно получать синхронно информацию о координатах места от навигационной системы АНПА и других устройств, таких как ГБО, эхолот, датчики глубины.

Как правило, большинство АНПА оснащено профилографами с ЛЧМ-модуляцией зондирующего сигнала. Использование сложных ЛЧМ-сигналов с уве-

личением длительности импульса с одновременным расширением полосы сигнала позволяет улучшить энергетику зондирующего сигнала, а следовательно, увеличить глубину проникновения сигнала в грунт. Кроме того, использование алгоритмов согласованной фильтрации позволяет добиться хорошего разрешения по глубине, улучшить помехоустойчивость и уменьшить энергопотребление АП. Малые габариты и малое энергопотребление делают ЛЧМ-профилограф наиболее эффективным устройством для использования его в составе бортовой аппаратуры АНПА по поиску заиленных донных и самозакапывающихся в грунт мин, а также для изучения геологической структуры морского дна.

В целях повышения эффективности гидроакустических средств и систем в настоящее время одной из главных задач является оснащение существующих гидроакустических комплексов и станций антеннами с синтезированной апертурой. Использование новых алгоритмов, таких как синтезирование апертуры антенны для обработки принятой гидролокационной информации, позволяет существенно улучшить тактико-технические характеристики изделия.

Синтезирование апертуры антенны первоначально использовалось в радиолокации. В дальнейшем этот метод нашел свое применение и в гидроакустике. Компания «*Dynamics Technology Inc.*», работающая по программе *DARPA*, разработала и создала ГБО с синтезированной апертурой. Гидролокатор бокового обзора американской фирмы «*QinetiQ GeoAcoustics Ltd*» применяется на борту подводных аппаратов «*Hugen*». Вопросы синтезирования апертуры в низкочастотных эхолотах-профилографах рассматривались в работе [1]. Однако предложенные ими алгоритмы не учитывают различия в скорости распространения звука в воде и донных отложениях и связанного с этим преломления звуковых лучей на границе раздела вода – морское дно, а потому являются весьма приближенными. Учет этих недостатков был устранен в работах [2]–[5].

■ Методика поиска малоразмерных объектов с использованием акустического профилографа с синтезированной апертурой

Для полного перекрытия обследуемого участка дна необходимо, чтобы расстояние между галсами составляло 18–28 м при высоте носителя антенны АП над дном 20–30 м и ширине диаграммы направленности антенны 55° . При необходимости очень подробного выделения локальных объектов сеть галсов уплотняется, а расстояние между галсами уменьшается до 5–10 м, зоны обследования по соседним галсам перекрывают друг друга, а исследуемый объект может наблюдаться и на соседних профилях [6].

Время съемки АНПА морского дна площадью на 1 км^2 при минном поиске с расстоянием между галса-

ми 10 м и скорости АНПА 1 м/с составляет примерно 29 часов с учетом времени на повороты. При увеличении расстояния между галсами до 28 м время обследования уменьшается до 11 часов. При обследовании протяженных участков дна в районе залегания трубопроводов, кабелей и т.д. поперечные профили выполняются в направлении, перпендикулярном основному направлению их расположения [7].

Выбор направления профилей съемки и последовательность их выполнения позволяет оптимизировать время съемки и в определенной степени влияет на получаемый результат. Разведочные съемки в большинстве случаев проводятся по сети согласно параллельных профилей [8]. После завершения профиля АНПА разворачивается и заходит на профиль, расположенный на некотором удалении от текущего (рис. 1, а), что позволяет оптимизировать временные затраты. Вследствие этого изучаемая площадь разделяется на два крупных блока с различным направлением профилей съемки [9]. Встречно-параллельные съемки, при которых ориентировка профилей чередуется, лишены этих недостатков, но для захода на соседний профиль, особенно при небольшом межпрофильном расстоянии, необходимо совершать дополнительные маневры (рис. 1, б). Поскольку именно этот тип съемки используется при проведении инженерно-геофизических исследований, например гидролокации бокового обзора, то его использование предпочтительно и при проведении комплексированных измерений с применением профилографа [9, 10].

Как показывают опыт измерений и различные теоретические подтверждения, такие как эффект сверхфокусировки [11], для акустического профилографа наиболее оптимальной является высота над дном на

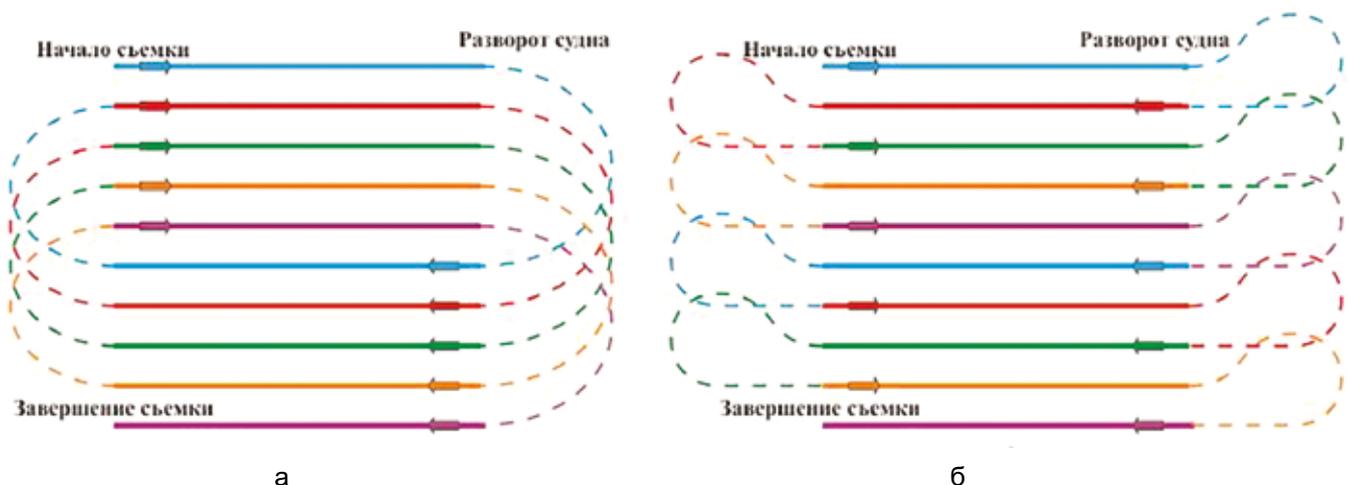


Рис. 1. Согласно-параллельная (а) и встречно-параллельная (б) съемка

борту АНПА 20–30 м. Как правило, на таких высотах одновременно с профилографической съемкой ведется НЧ ГБО съемка, поскольку рабочая высота над дном при этом у них совпадает. В случае очень мелкого моря АНПА ведет съемку с поверхности моря, за исключением случаев, когда длительность излучаемого импульса больше времени распространения отраженного от донной поверхности сигнала.

Отражения, присутствующие на профилограммах в виде параболических сигнатур, как показали многочисленные исследования, наблюдаются при обследовании трубопроводов, валунов, техногенных объектов, мин, неразорвавшихся снарядов – визитная карточка для выявления неоднородных включений этих объектов в менее плотный по составу в сравнении с ними морской грунт. Обработка профилографических данных методом синтеза апертуры позволяет получить более реалистичную картину изображения донных профилей, давая изображения локальных объектов почти в реальном размере.

■ Результаты поиска заиленных малоразмерных объектов и обработка полученных экспериментальных данных методом синтеза апертуры

Подробное описание теоретических исследований было приведено авторами в работах [2, 3, 4, 5]. Для анализа эффективности применения методов синтеза апертуры были использованы результаты измерений, полученные при обследовании различных участков дна с помощью АП. На рис. 2, а представлен участок дна длиной 195 м, имеющий двухслойную структуру, где в районе второго слоя заметна хорошо

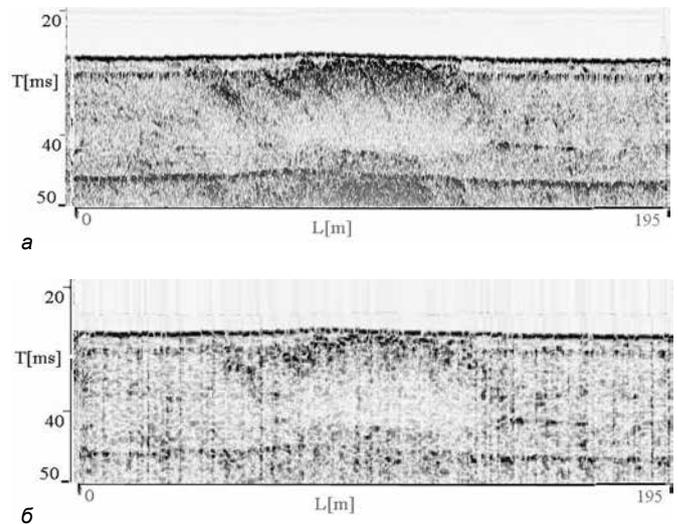


Рис. 2. Исходное изображение профиля дна (а), размер апертуры антенны -0.4м и обработанное изображение (б), размер синтезированной апертуры 7.4 м

консолидированная структура, состоящая из группы пирамидальных холмов. После обработки (рис. 2, б) с применением алгоритма синтеза апертуры структура принимает зернистый и уже не такой монолитный характер.

На рис 3, а представлен участок дна протяженностью 214 м с ярко выраженной слоистой структурой. Верхний илистый слой, лежащий на более плотном основании, содержит множество малоразмерных объектов техногенного происхождения, погруженных в ил на глубину порядка 1 м. Под искомым объектом на рис. 3 понимается объект с известными геометрическими размерами (фрагмент трубы диаметром 0.4 м и длиной 3 м). Под другими объектами понимается различный металлический мусор. На профи-

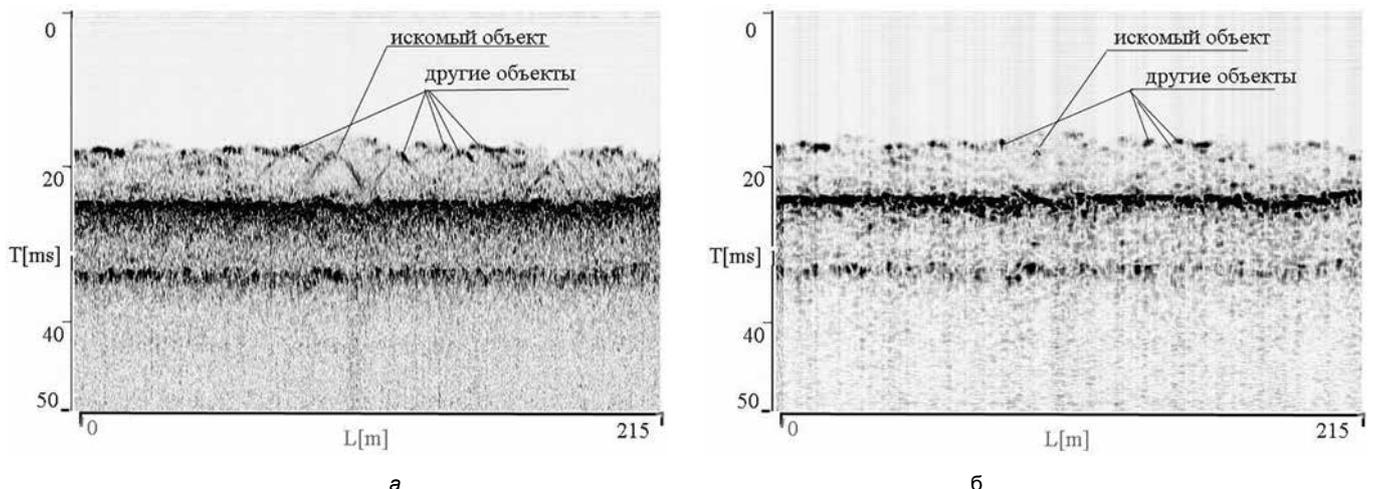


Рис.3. Исходное изображение профиля дна (а), размер апертуры антенны 0.4м и обработанное изображение (б), размер синтезированной апертуры 2.72 м

лограмме (рис 3, а) одиночные объекты регистрируются как протяжённые объекты в виде парабол, вершина которых соответствует реальному малоразмерному объекту. В результате обработки (рис 3, б) характерные параболические сигнатуры в месте расположения локальных объектов в толще дна превращаются в точечные объекты, улучшается разрешение, что позволяет реально оценить размеры локальных объектов.

■ Определение горизонтального размера исследуемого объекта с применением алгоритма синтезирования апертуры

Скорость движения носителя акустического профилографа $V = 1.5$ м/с, общая длина обследуемого участка составила 215 м (рис. 4), исходные размеры антенны $d_a = 0.4$ м, размер апертуры синтезирования $d = 2.72$ м (по 9 точкам, 8 отрезкам). Видимые горизонтальные размеры отраженных от искомого объекта сигналов в слое ила составили $L_r \sim 20.45$ м, после обработки $L_r \sim 2.16$ м. Ширина диаграммы направленности реальной антенны профилографа $\vartheta_a = 55^\circ$, поскольку угловая разрешающая способность определяется относительным размером апертуры λ/d , после обработки по алгоритму синтезирования по 9 точкам ширина диаграммы направленности синтезированной антенны должна составлять $\vartheta = 8.088^\circ$. Одно измерение должно охватывать $L_d = 2 \cdot H \cdot \text{tg}(\vartheta/2) = 1.75$ м при высоте антенны над объектом $H = 12.4$ м. Видимые

на профилограмме размеры исследуемого объекта L_r будут определяться как $L_r = L_d + L_o$, где L_o реальные горизонтальные размеры исследуемого объекта, поскольку из профилограммы рис. 4 видно, что $L_r = 2,16$ м и тогда $L_o = L_r - L_d = 2.16 - 1.75$ м = 0.41 м (диаметр реального объекта = 0.4 м). Точность измерения размеров объекта определяется частотой дискретизации по расстоянию, которая зависит от скорости движения АНПА, и частотой посылок импульсов. Кроме того, точность зависит от стабильности таких параметров, как прямолинейность движения носителя АП, постоянство скорости движения.

Заключение

Использование методов согласованной фильтрации позволяет производить профилографическую съемку с высокой помехоустойчивостью и хорошим разрешением по глубине, что очень важно при поиске заиленных объектов, несмотря на работу в относительно низкочастотном диапазоне. Широкая диаграмма направленности АП позволяет уверенно определять местоположение заиленного объекта, который отображается на профилограммах в виде параболической сигнатуры. Обработка принятых данных методами синтезирования апертуры позволяет уточнить размеры исследуемого объекта при сравнительно малом времени затрачиваемом на обработку принятых данных и вынесение заключения о вероятности обнаружения заиленных малоразмерных объектов, в том числе и потенциально опасных. Все перечисленное выше делает применение акустического профилографа с ЛЧМ-зондирующим сигналом с использованием алгоритмов обработки принятых сигналов методами синтезирования апертуры эффективным средством при поиске заиленных малоразмерных объектов, в том числе и потенциально опасных (мин и неразорвавшихся снарядов).

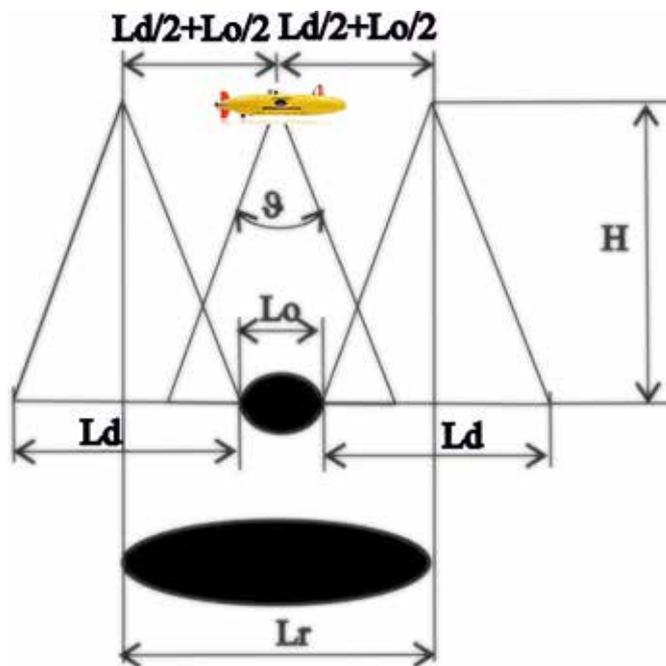


Рис. 4. К определению размеров искомого малоразмерного объекта по ширине диаграммы направленности синтезированной антенны



ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров А.И., Каевичер В.И., Разманова В.М., Раскатова В.Н. Применение методов синтезирования апертуры в низкочастотных эхолотах-профилографах // Тр. IX Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб.: Наука, 2008. С. 143–147.
2. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Анализ результатов обработки профилографических данных методом синтезирования апертуры // Научное обозрение. Технические науки. 2012. № 6. С.158–162.
3. Касаткин Б.А., Косарев Г.В. Результаты применения акустического профилографа для мониторинга морских акваторий с использованием алгоритмов синтезирования и фокусировки // Подводные исследования и робототехника. Владивосток, 2014, № 1(17). С. 33–38.
4. Патент России. Способ профилирования донных отложений / Касаткин Б.А., Касаткин С.Б., Косарев Г.В. № 2517983. 10.06.2014, Бюл. № 16.
5. Патент России. Способ профилирования донных отложений / Касаткин Б.А., Касаткин С.Б., Косарев Г.В. № 2518023. 10.06.2014, Бюл. № 16.
6. Гайнанов В.Г., Кузуб Н.А., Токарев М.Ю. [и др.] Опыт сейсмоакустического профилирования с многократным перекрытием: возможности и ограничения // Разведка и охрана недр. 2006. № 12. С. 21–25.
7. Докипедия. Свод правил СП 11-114-2004 «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромышленных сооружений» (одобрен письмом Госстроя РФ от 11 мая 2004 г. № ЛБ-21). [Электронный ресурс]. — <https://dokipedia.ru/document/5187940>. Загл. с экрана.
8. Vermeer G.J.O. 3D Seismic Survey Design. Second Edition SEG, 2012. 369 p.
9. Шматков А.А. Разработка методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях. Дис. канд. тех. наук: 25.00.10 / Шматков Алексей Алексеевич. М., 2016. 149 с.
10. Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Косарев Г.В. Эффект самофокусировки слабо направленного излучения при профилировании морского дна // Тр. X Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб, 2010. С. 350–353.

Об авторах

КАСАТКИН Борис Анатольевич, д.ф.-м.н., Г.Н.С., профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: Теоретическая и прикладная гидроакустика, распространение звуковых волн в слоистых волноводах
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0001-7392-3672

КОСАРЕВ Георгий Валерьевич, старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а
Область научных интересов: гидроакустические навигационные системы, акустические профилографы
ORCID ID: 0000-0002-2157-5482

Для цитирования:

Касаткин Б.А., Косарев Г.В. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ ПОИСКА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В МОРСКОМ ДНЕ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2 (36). С. 41–46. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_04.



EXPERIENCE OF APPLICATION OF ACOUSTIC PROFILOGRAPH WITH SYNTHESIZED APERTURE FOR SEARCHING FOR SMALL OBJECTS IN THE SEA BOTTOM

B.A. Kasatkin, G.V. Kosarev

The experience of using a small-sized acoustic profiler with chirp modulation of the sounding signal located onboard the AUV and designed to search for small-sized silted objects in the seabed is analyzed. The profiler resolution was increased by using aperture synthesis algorithms. The method of profilographic survey of the seabed is described concerning the search and detection of small-sized objects. The size of the detected small-sized targets was estimated using the aperture synthesis algorithm. Performance calculation of the profilographic survey regarding the duration of the survey of a given area, the costs of the primary processing of the obtained data, and secondary processing by synthesizing the aperture has been performed.

Keywords: acoustic profiler, seabed profiling, aperture synthesis method, autonomous unmanned underwater vehicle, aperture synthesis algorithm.

References

1. Zakharov, A.I.; Kaevitser, V.I.; Razmanova, V.M.; Raskatova, V.N. Application of aperture synthesis methods in low-frequency echo sounders-profilographs. Proceedings of the IX All-Russian Conference «Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics». SPb.: Science. 2008. P. 143–147
2. Kasatkin, B.A.; Kosarev, G.V. Analysis of the results of profilographic data processing by the aperture synthesis method. Scientific Review. Technical science. 2012. No. 6. P. 158–162.
3. Kasatkin, B.A.; Kosarev, G.V. The results of the use of an acoustic profiler for monitoring sea areas using synthesis and focusing algorithms. Underwater Research and Robotics. Vladivostok, 2014, No. 1 (17). P. 33–38.
4. Kasatkin, B.A.; Kasatkin, S.B.; Kosarev, G.V. Method for profiling bottom sediments. Patent of Russia N 2517983.10.06.2014. Bul. No. 16.
5. Kasatkin, B.A.; Kasatkin, S.B.; Kosarev, G.V. Method for profiling bottom sediments. Patent of Russia No. 2518023. 10.06.2014. Bul. No. 16.
6. Experience of seismoacoustic profiling with multiple overlap: possibilities and limitations / V.G. Gainanov, N.A. Kuzub, M.Yu. Tokarev [and others]. Exploration and protection of mineral resources. 2006. No. 12. P. 21–25.
7. Docipedia. The set of rules SP 11-114-2004 “Engineering surveys on the continental shelf for the construction of offshore oil and gas facilities” (approved by the letter of the State Construction Committee of the Russian Federation of May 11, 2004 No. LB-21). [Electronic resource]. Access mode: <https://dokipedia.ru/document/5187940>. Head. from the screen.
8. Vermeer, G.J.O. 3D Seismic Survey Design. Second Edition / G.J.O. Vermeer. SEG, 2012. 369 p.
9. Shmatkov A.A. Development of a technique for three-dimensional seismoacoustic observations in shallow water areas. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 25.00.10. Shmatkov Aleksey Alekseevich. M., 2016. 149 p.
10. Zlobina, N.V.; Kasatkin, B.A.; Kasatkin, S.B.; Kosarev, G.V. Self-focusing effect of weakly directed radiation during profiling of the seabed. Proceedings of the X All-Russian Conference. «Applied Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics». SPb. 2010. P. 350–353

About the authors

KASATKIN Boris Anatolievich, Doctor of Physics and Mathematics Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a
Research interests: Theoretical and applied hydroacoustics, sound wave propagation in layered waveguides
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru
ORCID ID: 0000-0001-7392-3672

KOSAREV Georgij Valer'evich, senior researcher Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 690091, Vladivostok, Suhanova str., 5a
Research interests: Hydroacoustic navigation systems, acoustic profilographs
ORCID ID: 0000-0002-2157-5482

Recommended citation:

Kasatkin B.A., Kosarev G.V. EXPERIENCE OF APPLICATION OF ACOUSTIC PROFILOGRAPH WITH SYNTHESIZED APERTURE FOR SEARCHING FOR SMALL OBJECTS IN THE SEA BOTTOM. Underwater investigation and robotics. 2021. No. 2(36). P. 41–46. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_04.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКЕАНЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЕКТОРНОЙ ПРИРОДОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

В.А. Щуров, С.Г. Щеглов, А.С. Ляшков, Е.С. Ткаченко

На основе концепции векторно-фазового метода проведены теоретические и экспериментальные акустические исследования глубокого океана и мелкого моря. Впервые обнаружены и исследованы такие фундаментальные явления, как компенсация встречных потоков энергии, вихри вектора плотности потока акустической энергии, анизотропия подводного акустического шума в области низких и средних частот, разработаны алгоритмы обработки на основе четвертого статистического момента, определена помехоустойчивость комбинированных приемных систем относительно квадратичного детектора, созданы приемные комбинированные системы, не имеющие мировых аналогов. В работе представлен обзор явлений, связанных с векторной природой плотности потока энергии (вектора интенсивности).

Ключевые слова: векторно-фазовый метод, вектор акустической интенсивности, вихрь акустической интенсивности, компенсация потоков энергии, четвертый статистический момент

Введение

История подводной акустики (гидроакустики) связана с первым применением французским ученым Ланжевром в 1914 г. датчика давления, помещенного в морскую среду (впоследствии названного гидрофоном) для акустического обнаружения подводных лодок. До настоящего времени гидрофон являлся основным приемным устройством в исследовании акустического поля в океане.

Однако для полного описания акустического поля, как это следует из уравнений гидродинамики, необходимо и достаточно знать восемь величин: трех компонент вектора колебательной скорости частиц среды $\vec{V}(x, y, z, t) \{V_x, V_y, V_z\}$, двух скалярных величин – акустического давления $p(x, y, z, t)$, плотности среды $\rho(x, y, z, t)$ и трех разностно-фазовых соотношений $\Delta\varphi_{\rho V_x}(x, y, z, t)$, $\Delta\varphi_{\rho V_y}(x, y, z, t)$, $\Delta\varphi_{\rho V_z}(x, y, z, t)$. В процессе обработки данных получаем второй статистический момент – вектор плотности потока акустической энергии (вектор интенсивности). Впервые уравнение движения энергии в непрерывных средах сформулировал выдающийся русский ученый Николай Алексеевич Умов (1846–1915 гг.). В 1873 г. он ввел понятие вектора плотности потока энергии – основополагающего понятия современной физики, названного вектором Умова. Вектор акустической

интенсивности есть усредненный вектор Умова. В данной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований вектора плотности потока энергии акустического поля реального океана авторы выделяют несколько явлений, наблюдение которых с помощью измерения только акустического давления невозможно. Обозначим область векторных явлений как векторную акустику, в отличие от области явлений, связанных со скалярной интенсивностью, как это обозначено в [1].

1. КОНЦЕПЦИЯ ВЕКТОРНО-ФАЗОВОГО МЕТОДА

Концептуальная связь восьми искомых акустических величин вытекает из следующего представления. Рассмотрим разложение в ряд Тейлора акустического давления $p(x, y, z, t)$ в окрестности некоторой точки $M_0(x, y, z, t)$ малой области D [2, 3]:

$$p(x, y, z, t) = p(x_0, y_0, z_0, t) + (x - x_0) \frac{\partial p(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial p(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial p(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial z} + \dots \quad (1)$$

Уравнение Эйлера $\vec{V} = -\frac{1}{\rho} \int \text{grad } p \, dt$ для гармонической волны с частотой ω запишем в виде

$\vec{V} = -\frac{1}{j\rho\omega} \text{grad } p$. Таким образом, в разложении (1) первые производные $\frac{\partial p}{\partial x}$, $\frac{\partial p}{\partial y}$, $\frac{\partial p}{\partial z}$ пропорциональны компонентам колебательной скорости V_x , V_y , V_z . Физический смысл выражения (1) заключается в том, что мы измеряем давление по всей площади бесконечно малой области D . Измеряя одновременно в одной точке акустического поля акустическое давление p , компоненты $\text{grad } p \left(\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right)$ и определяя фазовые соотношения между данными компонентами, получаем полную информацию о векторном акустическом поле в данной точке, если в области D нет источников звука.

В эксперименте векторные характеристики акустического поля определяются из измерений компонент градиента давления (градиентный векторный приемник) или непосредственно, из измерений ортогональных компонент колебательной скорости (электродинамический векторный приемник). Необходимость векторно-фазового метода возникает из требования полного знания характеристик акустического поля, и его внедрение в акустическую практику является достаточным для адекватного описания акустического поля. Одно из универсальных качеств векторного приема заключается в том, что из измерений в одной точке акустического поля возможно определить направление на источник звука.

Концепция векторно-фазового метода основана на одновременных измерениях в одной точке акустического поля скалярной величины акустического давления $p(x, y, z, t)$, трех ортогональных компонент вектора колебательной скорости частиц среды $\vec{V}(x, y, z, t) \{V_x, V_y, V_z\}$ и разностно-фазовых соотношений между ними. Данный подход был сформулирован проф. Ржевкиным С.Н. как векторно-фазовый метод в шестидесятых годах прошлого века (кафедра акустики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова) [2, 3].

2. ПОДВОДНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ПРИЕМНЫЕ КОМБИНИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Фундаментальная теория измерения колебательной скорости частиц непрерывной среды в акустической волне изложена в [4, 5].

Исследования акустических полей в реальной подводной среде представляет собой сложную задачу в методологическом и техническом отношении. Это связано прежде всего с тем, что величины

давления и колебательной скорости частиц среды в акустической волне несоизмеримы с окружающими гидродинамическими возмущениями этих величин. Приведем следующий пример. Спектральная плотность окружающего шума в диапазоне частот 400–1000 Гц при скорости приводного ветра 7.5–9.8 м/с находится вблизи спектрального уровня, равного 60 дБ отн. 1 мкПа, соответствует акустическому давлению равному 10^{-3} Па, что соответствует акустической интенсивности, равной $I = 0.667 \cdot 10^{-15}$ Вт/м².

Если взять $f = 1000$ Гц и $p_m = 10^{-3}$ Па, то получим: амплитуда смещения частиц среды $\xi_m \approx 10^{-10}$ см, амплитуда колебательной скорости $V_m \approx 10^{-7}$ см/с, амплитуда ускорения частиц среды $a_m \approx 10^{-4}$ см/с².

Из значения для V_m следует, что при измерении окружающего подводного акустического шума мы встречаемся с исключительно малыми смещениями и колебательными скоростями частиц среды, что чрезвычайно усложняет процесс векторных измерений в реальном океане.

Создание комбинированных векторно-фазовых систем и методологии совместных измерений скалярных и векторных величин акустического поля является новым этапом в развитии современной подводной акустики. На протяжении многих лет в ТОИ ДВО РАН создавалась приемная акустическая векторно-фазовая техника, многие из приемных систем не имеют аналогов в мировой технике.

Примеры комбинированных векторно-фазовых систем приведены на рис. 1–6.

Подробное описание технических характеристик приемных систем дано в [6, 7]



Рис. 1. Электродинамический низкочастотный трехкомпонентный векторный приемник. Максимальная глубина погружения 1000 м. Рабочий диапазон 1–100 Гц. Осевая чувствительность каналов 10 мкВ/Па



Рис. 2. Акустический низкочастотный четырехкомпонентный комбинированный приемник в корзине обтекателя. Векторный приемник (сфера) – трехкомпонентный приемник градиента давления. Диапазон рабочих частот 10–1000 Гц. Чувствительность приемника давления 500 мкВ/Па. Осевая чувствительность векторного канала 1200 мкВ/Па на частоте 1000 Гц.



Рис. 3. Комбинированные четырехканальные приемные модули без обтекателя на борту НИС перед постановкой. Залив Петра Великого. 2008 г.

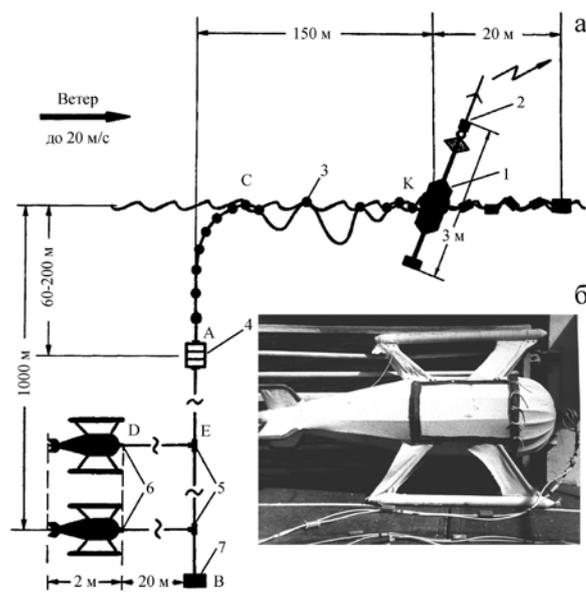


Рис. 4. Свободно дрейфующая телеметрическая автономная низкочастотная комбинированная приемная система. а – схема постановки в глубоком открытом океане; б – приемный комбинированный модуль в обтекателе. Разработана в 1985 г.

Рис. 5. Беспилотный носитель – глайдер с приемной комбинированной системой. Разработка ТОИ и МГУ им. адм. Невельского. 2007–2015 гг.

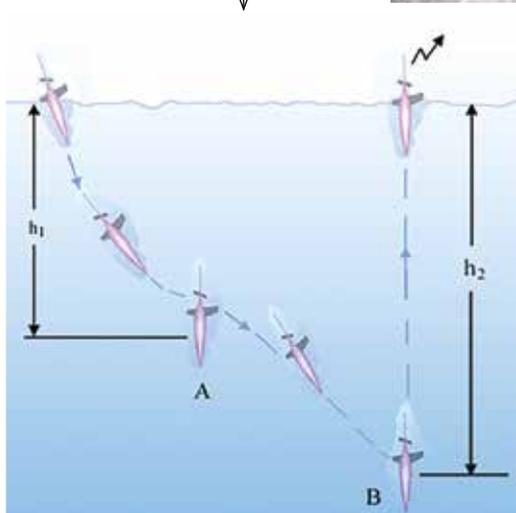


Рис. 6. Восьмиканальный комбинированный приемный модуль в обтекателе. Один из приемных элементов акустического интерферометра интенсивности (аналог оптического интерферометра Юнга–Релея). Бух. Витязь. 2013 г.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Описываются акустические явления, наблюдаемые в глубоком океане и мелком море с помощью векторно-фазовых акустических приемных систем.

3.1. Явление компенсации интенсивности встречных потоков акустической энергии [6–9].

Компенсация потоков энергии, которую мы исследуем, не является результатом интерференции встречных когерентных волн одной частоты (случай стоячей волны).

Обращение в нуль средней мощности встречных некогерентных потоков энергии есть результат их векторной природы. Ярким примером компенсации встречных потоков акустической энергии является диффузное поле [6, 10].

Пусть в точку измерения с направлений \vec{s}_1 и \vec{s}_2 приходят две локально-плоские волны. Результирующий поток энергии вдоль некоторого направления \vec{s}_0 запишем в виде:

$$I_{\vec{s}_0} = \frac{1}{2} p_1 v_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} p_2 v_2 \cos \theta_2, \quad (2)$$

где $I_1 = \frac{1}{2} p_1 v_1$ и $I_2 = \frac{1}{2} p_2 v_2$ – усредненные плотности потока энергии первой и второй локально-плоских волн соответственно; θ_1 и θ_2 – углы между направлениями \vec{s}_0 и \vec{s}_1, \vec{s}_2 соответственно.

Рассмотрим компенсацию по оси z . Направим \vec{s}_0 по оси $+z$. Интенсивность потока энергии динамического шума равна $\frac{1}{2} (p_1 v_{1,+z})_N$ и $\theta_1 = 0^\circ, \cos \theta_1 = 1$. Для встречного потока энергии сигнала, отраженного от дна, интенсивность равна $-\frac{1}{2} (p_2 v_{2,+z})_S$ и $\theta_2 = 180^\circ, \cos \theta_2 = -1$. Поэтому результирующий усредненный поток энергии вдоль оси z запишем:

$$I_z = \frac{1}{2} (p_1 v_{1,+z})_N - \frac{1}{2} (p_2 v_{2,+z})_S = I_{+z,N} - I_{-z,S}. \quad (3)$$

Аналогично для двух встречных потоков энергии, распространяющихся вдоль оси $+x$ (горизонтальный поток энергии динамического шума) и $-x$ (поток энергии от локального источника), запишем:

$$I_x = \frac{1}{2} (p_1 v_{1,+x})_N - \frac{1}{2} (p_2 v_{2,+x})_S = I_{+x,N} - I_{-x,S}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) для средних значений результирующих компонент I_z и I_x плотности потока энергии могут обратиться в нуль при равенстве их слагаемых. В этом случае в среднем будет наблюдаться полная компенсация интенсивности двух встречных потоков акустической энергии. Если средние значения слагаемых не равны, но одного порядка, будет наблюдаться частичная (неполная) компенсация интенсивности. Таким образом, компенсацию интенсивности встречных потоков энергии возможно наблюдать как для когерентных встречных потоков

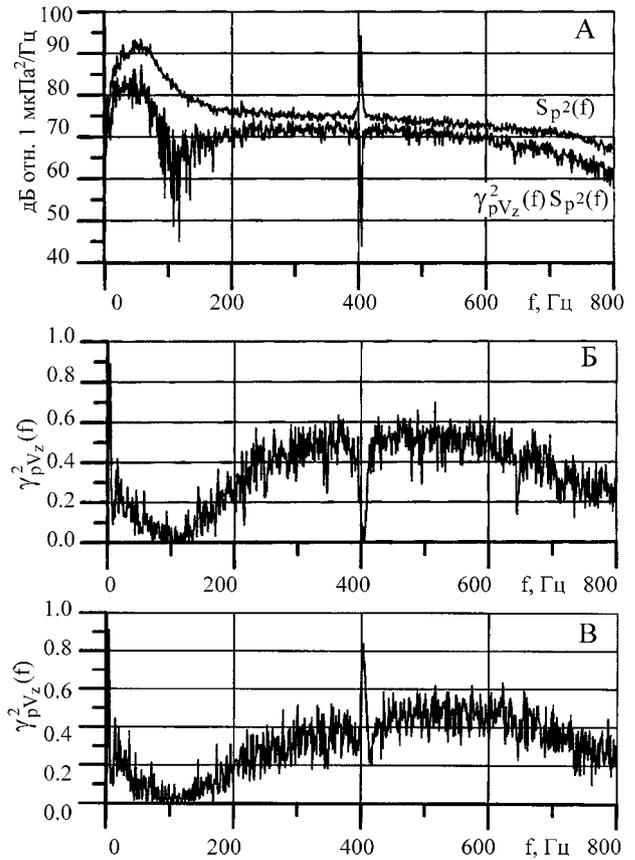


Рис. 7. Пример взаимодействия встречных потоков энергии тонального сигнала с полем подводного акустического шума

энергии, так и для статистически независимых случайных волновых полей.

Новые интересные результаты в этой области представлены в [7, 11].

На рис. 7 использованы следующие обозначения: А: $S_{p^2}(f)$ – спектр мощности акустического давления шума и сигнала 402 Гц (потоки $S_{p^2}(f)$ сигнала и шума суммируются); $S_{pV_z}(f) = \gamma_{pV_z}^2(f) S_{p^2}(f)$ – z-компонента взаимного спектра (потоки энергии сигнала и шума вычитаются); Б и В: $\gamma_{pV_z}^2(f)$ – функция частотной когерентности. В случае Б z-компонента вектора плотности потоков энергии сигнала и шума равны. В случае В z-компонента сигнала превышает z-компоненту шума. Частота тонального сигнала 402 Гц. Глубина измерения 500 м. Полоса анализа 1 Гц, время усреднения 60 с, усреднение экспоненциальное. Эксперимент выполнен в центральной части Тихого океана. [6]

3.2. Вихри вектора акустической интенсивности в волноводе мелкого моря

Теоретические описания вихрей в электромагнитном поле акустического диапазона дано в [12].

Механизм возникновения локального вихря вектора акустической интенсивности (далее – вихрь) в дальнем поле источника определен циклом теоретических работ Ю.А. Кравцова и др. в 1989–1993 гг. [13, 14]. Вихри в ближнем поле акустического источника известны давно [15]. Впервые вихри вектора акустической интенсивности в дальнем поле источника были обнаружены в августе 2008 г. в экспериментальных исследованиях в заливе Петра Великого Японского моря [16].

При математическом описании сигнал считаем комплексным и гармоническим; поле считаем стационарным и эргодическим. Представляя акустическое поле в комплексном виде, введем понятие комплексной интенсивности [7]:

$$\vec{I}_c(\vec{r}) = \frac{1}{2} p(r) \vec{V}^*(\vec{r}) = \vec{I}(\vec{r}) + i\vec{Q}(\vec{r}) = \text{Re} \vec{I}_c(\vec{r}) + i \text{Im} \vec{I}_c(\vec{r}) \quad (5)$$

где $\vec{I}(\vec{r}) = \text{Re} \vec{I}_c(\vec{r})$ – вектор активной интенсивности, $\vec{Q}(\vec{r}) = \text{Im} \vec{I}_c(\vec{r})$ – вектор реактивной интенсивности, \vec{r} – пространственная переменная, $i = \sqrt{-1}$. Если интерференционное поле образовано большим числом независимых волн (лучей), то $\text{Re} \vec{I}_c(\vec{r})$ и $\text{Im} \vec{I}_c(\vec{r})$ – независимые случайные функции с гауссовой статистикой.

Для свободного поля векторные свойства активной $\vec{I}(r, t)$ и реактивной $\vec{Q}(r, t)$ интенсивностей могут быть выражены (в дифференциальной форме) через ротор и дивергенцию комплексной интенсивности $\vec{I}_c(r, t)$ для случая гармонического сигнала:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{I}_c(r) &= (k/c) \left[(\vec{I} \times \vec{Q}) / U \right], \\ \text{div} \vec{I}(r) &= 0, \quad \text{rot} \vec{Q}(r) = 0, \\ \text{div} \vec{Q}(r) &= 2\omega(T - U) = -2\omega L, \end{aligned} \quad (6)$$

где L – лагранжиан; $U = \frac{1}{4\rho c^2} p(r)p^*(r)$ – плотность потенциальной энергии; $T = \frac{\rho}{4} \vec{V}(r)\vec{V}^*(r)$ – плотность кинетической энергии. Из системы уравнений (7) следует, что вектор активной интенсивности (т.е. вектор плотности потока энергии (вектор Умова)) по своей природе будет обладать вихревыми свойствами при условии $\vec{I} \times \vec{Q} \neq 0$, т.е. если вектора \vec{I} и \vec{Q} неколлинеарны. Как показывает натурный эксперимент, в интерференционном поле мелкого моря это условие выполняется, хотя оно сформулировано для свободного поля. Фундаментальность данного явления, как следует из (7), заключается в том, что ротор может быть не равным нулю, а именно:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{I}_c &= \text{rot} (p \vec{V}^*) = p \text{rot} \vec{V}^* + \left[\text{grad} p \times \vec{V}^* \right] = \\ &= \left[\text{grad} p \times \vec{V}^* \right], \text{ поскольку } \text{rot} \vec{V}^* = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Используя уравнение Эйлера $\vec{V} = -\frac{1}{i\rho\omega} \text{grad} p$, соотношение (8) запишем в виде [3]:

$$\begin{aligned} \text{rot} (p \vec{V}^*) &= -i \frac{\omega\rho}{2} \left[\vec{V} \times \vec{V}^* \right] = \\ &= -2\omega\rho \left[\begin{aligned} &V_y V_z \sin(\phi_z - \phi_y) \mathbf{i} + V_x V_z \sin(\phi_z - \phi_x) \mathbf{j} + \\ &+ V_y V_x \sin(\phi_x - \phi_y) \mathbf{k} \end{aligned} \right] = \\ &= -2\omega\rho \left(\text{rot}_x p \vec{V}^* + \text{rot}_y p \vec{V}^* + \text{rot}_z p \vec{V}^* \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $p = P_0 e^{i(\omega t - \phi_p)}$ – акустическое давление; $\vec{V} = \vec{V}_0 e^{i(\omega t - \phi_v)}$ – вектор колебательной скорости; \vec{V}^* – комплексно-сопряженное значение вектора колебательной скорости; ω – круговая частота; ρ – невозмущенное значение плотности среды; V_j – амплитудное значение компонент колебательной скорости ($j = x, y, z$); $(\phi_z - \phi_y)$, $(\phi_z - \phi_x)$, $(\phi_x - \phi_y)$ – разности фаз между компонентами колебательной скорости; \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} – единичные векторы декартовой системы координат. Из (8) следует, что вихрь вектора интенсивности может возникнуть не только вблизи источника излучения, но и в дальнем поле источника, при условии, что, хотя бы одна из разностей фаз была отлична от нуля.

В интерференционном поле тонального сигнала мелкого моря появление вихрей вектора акустической интенсивности является скорее правилом, чем исключением. Для наблюдения этого явления требуется высокое качество векторно-фазовой техники эксперимента. На рис. 8 представлены зависимости спектральной плотности мощности акустического давления $S_{p^2}(t)$, x -, z -компонент колебательной скорости $S_{V_x^2}(t)$, $S_{V_z^2}(t)$ на временной реализации длительностью 200 с. Кривые $S_{p^2}(t)$ и $S_{V_x^2}(t)$ подобны, интерференция в вертикальной плоскости $S_{V_z^2}(t)$ имеет иной вид. Из рис. (9–11) следует, что интерференционный процесс связан с интенсивными процессами преобразования потенциальной энергии $\sim p^2(t)$ и x - и y -компонент кинетической энергии $\sim V_x^2(t)$, $V_z^2(t)$. Области деструктивной интерференции, в которых наблюдаются вихри α , β , γ , отмечены темным полем (рис. 8).

Линия тока энергии сигнала вдоль оси волновода в вертикальной плоскости xOy определяется углом скольжения $\theta(t)$ (рис. 9, А). Скачки угла $\theta(t)$ на $\pi/2$ в окрестности локальных вихрей α , β , γ согласуются с теоретической кривой (сплошная линия), взятой из [14]. Компонента вектора интенсивности $\vec{I}_{xz} = \vec{I}_x(t) + \vec{k} I_z(t)$, являясь касательной к кривой $\theta(t)$,

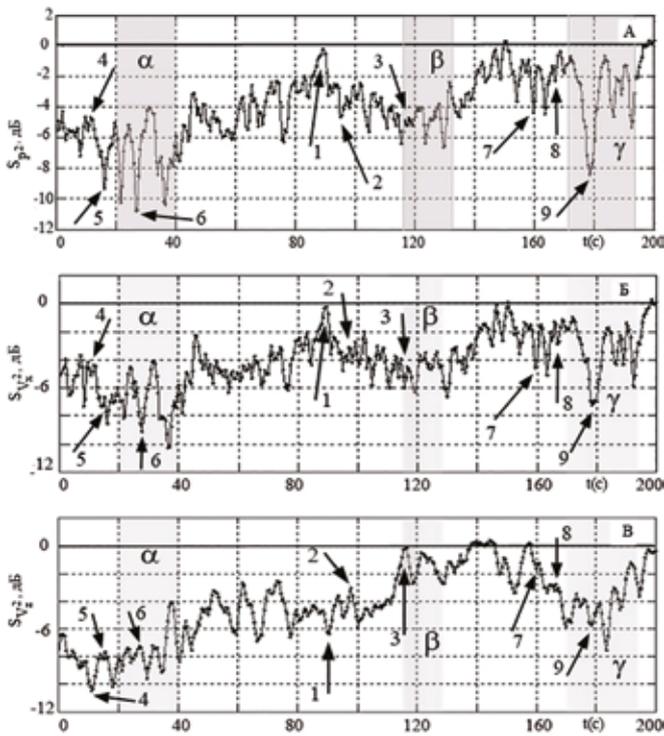


Рис. 8. Зависимость от времени: А – спектральной плотности акустического давления $S_{p_2}(t)$, Б – $S_{V_x^2}(t)$, В – $S_{V_z^2}(t)$. Время усреднения 1 с. Полоса частот (88 ± 1) Гц. Первый приемник. Уровень дБ выбран произвольно

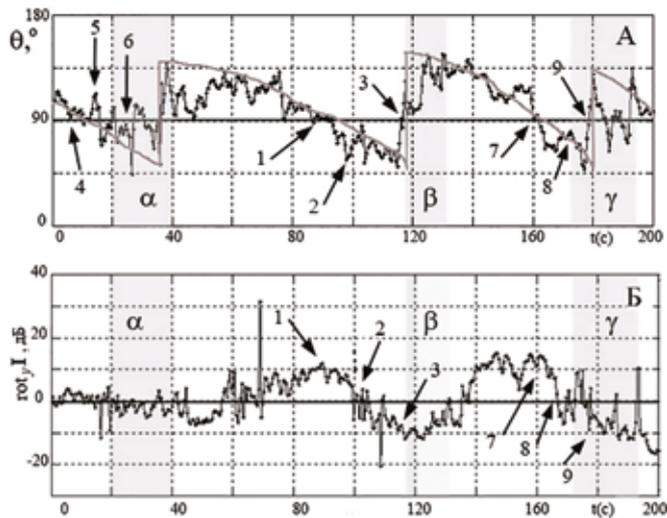


Рис. 9. Зависимость от времени: А – угол скольжения тока энергии $\theta(t)$, Б – y-компонента ротора $rot_y I(t)$. Частота 88 Гц, время усреднения – 1 с. Угол $\theta = 90^\circ$ соответствует оси x.

также отклоняется от оси x в окрестности локальных вихрей, что порождает завихренность поля вектора интенсивности в вертикальной плоскости xOz. В результате «обтекания» вихрей потоками акустической энергии возникает завихренность вектора плотности потока энергии с отличной от нуля z-компонентой потока энергии. Степень завихренности в

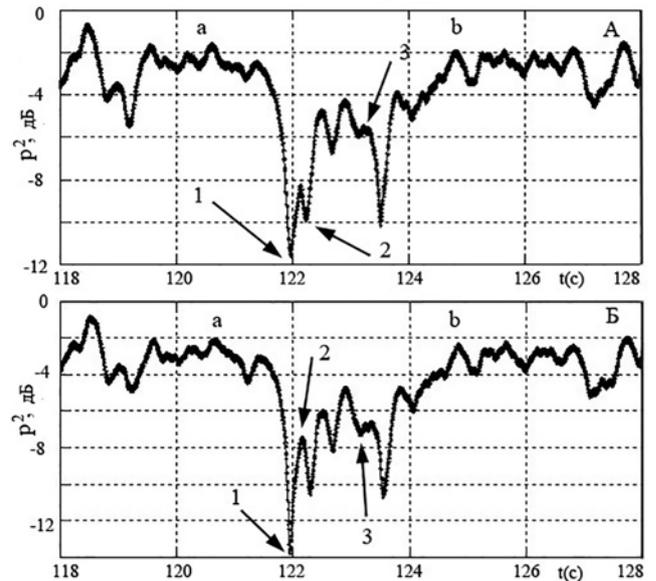


Рис. 10. Вихрь β . Зависимость от времени огибающей спектральной плотности мощности акустического давления $S_{p_2}(t)$. А – первый приемник, Б – второй приемник. Частота 88 Гц. Время усреднения 0,025 с. Минимум $S_{p_2}(t)$ указывает на первый признак присутствия вихря. Приемники разнесены по горизонтали на расстояние 1,5 м. Уровень дБ выбран произвольно. Вихрь β неподвижен [17]

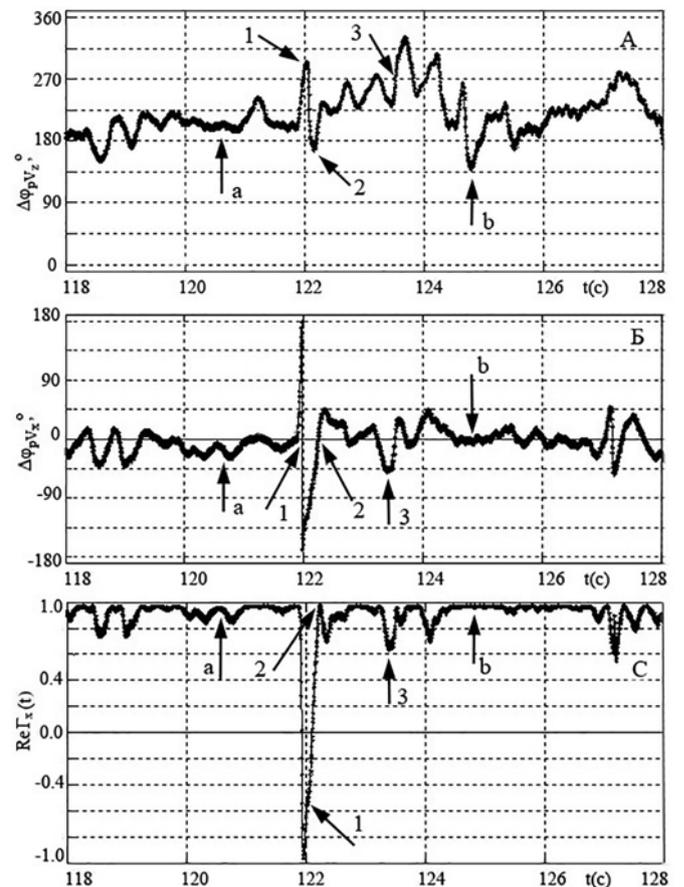


Рис. 11. Вихрь β . Первый приемник. Зависимость от времени: А – разность фаз $\Delta\phi_{pV_z}(t)$, Б – разность фаз $\Delta\phi_{pV_x}(t)$, В – реальная часть x-компоненты функции временной когерентности $Re\Gamma_x(t)$. Скачки функции $\Delta\phi_{pV_z}(t)$ и $\Delta\phi_{pV_x}(t)$ соответствуют второму признаку вихря. Скачок указывает на перенос энергии в сторону источника. Время усреднения 0.025 с

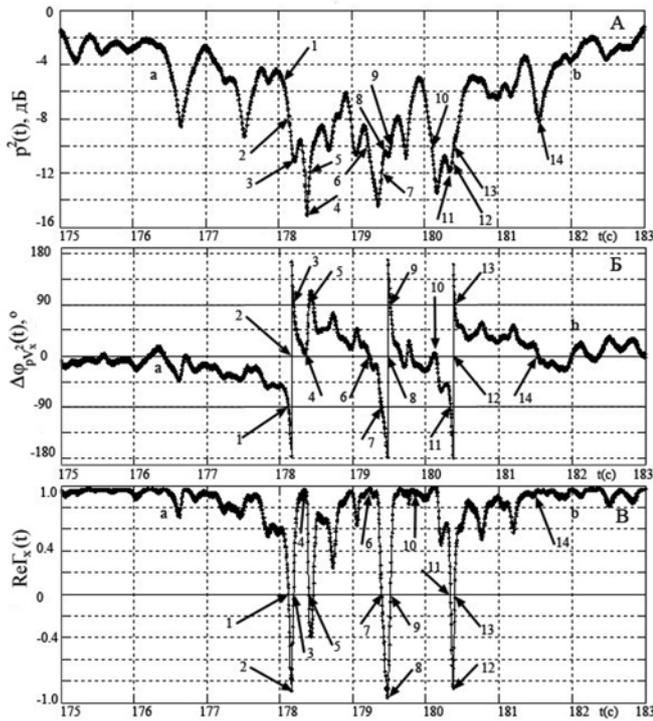


Рис. 12. Вихрь γ . Первый приемник. Зависимость от времени: А – огибающая акустического давления $S_{p2}(t)$, Б – разность фаз $\Delta\varphi_{pV_x}(t)$, В – реальная часть x -компоненты функции временной когерентности $\text{Re}\Gamma_x(t)$. Время усреднения – 0.025 с.

данном случае определяется y -компонентой ротора вектора интенсивности $\text{rot}_y \vec{I}(t)$ (рис. 9, Б). Все исследуемые характеристики поля являются детерминированными функциями и образуют замкнутую систему функций.

Вихрь β наблюдается в области деструктивной интерференции на временном интервале $\Delta T = 118 \text{ с} - 128 \text{ с} = 10 \text{ с}$, что соответствует пространственному интервалу 15 м. Расстояние между приемником и источником равно $\sim 520 \text{ м}$. Время усреднения – 0.025 с. Пространственный интервал усреднения $\sim 0.04 \text{ м}$. На рис. 10, 11 приведены следующие функции: $S_{p2}(t)$, $\Delta\varphi_{pV_z}(t)$, $\Delta\varphi_{pV_x}(t)$, $\text{Re}\Gamma_x(t)$. Из рис. 10, 11 следует, что акустический центр комбинированного приемника находится в области вихря.

Рассмотрим вихрь γ , наблюдаемый при значительном удалении от источника звука, на дистанции $\sim 1000 \text{ м}$. Частота излучения 88 Гц (рис. 12). Условия эксперимента те же. Время наблюдения $\Delta T = 6 \text{ с}$ (интервал ab), пространственный интервал, занимаемый вихрем, $\sim 9 \text{ м}$. Время усреднения 0,025 с, пространственный интервал усреднения 0,04 м. При длине волны $\lambda = 17 \text{ м}$ линейный размер вихря должен быть равен $\sim 1,7 \text{ м}$. На интервале 1,7 м укладывается ~ 42 пространственных интервала усреднения, что обеспечивает высокую точность сканирования вихря

и его движение. Вихрь γ колеблется вдоль горизонтальной оси волновода с частотой $\sim 2 \text{ Гц}$ [7].

4. ЧЕТВЕРТЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ МОМЕНТ ВЕКТОРА АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Вектор плотности потока энергии (вектор интенсивности) является статистическим моментом второго порядка:

$$\vec{I}(f) = p(f, t) \vec{V}(f, t)_p \quad (9)$$

где $p(f, t)$, $\vec{V}(f, t)$ – мгновенные значения акустического давления и вектора колебательной скорости, соответственно; знак $\langle \dots \rangle_t$ означает усреднение по времени. Выражение (9) есть функция взаимной корреляции двух случайных процессов акустического давления $p(t)$ и вектора колебательной скорости $\vec{V}(t)$, при относительном временном сдвиге $\tau = 0$. Акустическое поле считаем стационарным, эргодичным, величины $p(t)$ и $\vec{V}(t)$ – центрированными. Сигналы считаем монохроматическими.

Рассматривая связь акустической интенсивности во времени и в различных точках пространства, мы приходим к моменту четвертого порядка [18].

Корреляционную функцию интенсивности запишем в виде:

$$\psi_I(\tau) = I_1(t + \tau) I_2(t) - I_1(t) I_2(t + \tau), \quad (10)$$

где τ – относительная временная задержка, обусловленная разностью хода длин волн Δl от локального источника до каждого из двух приемников (рис. 13).

В результате формула (10) приводится к виду: $\psi_I(\tau) = |B_{12}(\tau)|^2 = I_1 I_2 |K_{12}(\tau)|^2$, где $K_{12}(\tau)$ – коэффициент корреляции для комплексных амплитуд,

$$K_{12}(\tau) = \frac{B_{12}(\tau)}{2\sqrt{I_1 I_2}} = |K_{12}(\tau)| e^{i\theta_{12}(\tau)}.$$

В окончательном виде корреляционную функцию интенсивности запишем в виде:

$$\psi_I(\tau) = I_1 I_2 |K_{12}(\tau)| \cos \theta_{12}(\tau). \quad (12)$$

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.

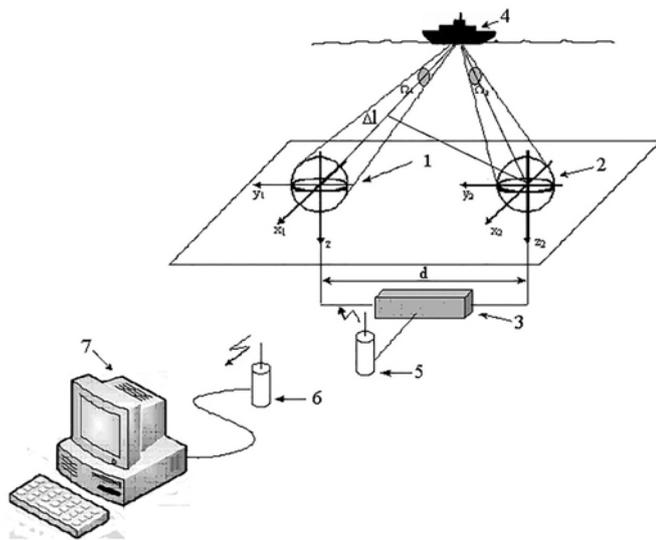


Рис. 13. Схема эксперимента на основе акустического интерферометра интенсивности (аналог оптического интерферометра Юнга–Релея). Обозначения: 1, 2 – комбинированные приемники; 3 – гермоконтейнер с электронной аппаратурой; 4 – источник звука, $\Delta l = \tau \cdot c$ – разность хода длин волн; $d = 300$ м – расстояние между приемниками (база интерферометра); 5, 6 – приемопередатчики; 7 – многоканальная цифровая система обработки информации

ВЫВОДЫ

На основе концепции акустического векторно-фазового метода разработаны экспериментальная векторно-фазовая техника измерений для проведения исследований в условиях реальной океанической среды, методы математической обработки многоканальной информации. Разработанный математический аппарат составляет замкнутую систему скалярных и векторных функций, позволяющий на основе восьми параметров акустического поля описать акустические процессы, происходящие в реальном океане. В результате многолетних теоретических и экспериментальных исследований акустического поля реального океана был обнаружен ряд физических явлений в океане, которые невозможно наблюдать, используя измерения только акустического давления. Акустические явления, обусловленные векторной природой интенсивности, и векторно-фазовый метод исследований могут рассматриваться в совокупности как «векторная акустика океана» в отличие от той области акустики, которая основана на исследовании процессов в их скалярном описании (на основе измерений акустического давления).

ЛИТЕРАТУРА

1. Чупров С.Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане // Акустика океана. Современное состояние / под. ред. Л.М. Бреховских. М.: Наука, 1982. С. 71–91.
2. Захаров Л.Н., Ржевкин С.Н. Векторно-фазовые измерения в акустическом поле // Акуст. журн. 1974. Т. 20, № 3. С. 52–61.
3. Воробьев С.О., Сизов В.И. Векторно-фазовая структура и векторно-фазовый метод описания и анализа случайных акустических полей // Акуст. журн. 1992. Т. 38, № 4. С. 654–659.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
5. Ржевкин С.Н. О колебаниях тел, погруженных в жидкость, под действием звуковой волны // Вестн. МГУ. 1971. № 1. С. 52–61.
6. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 307 с.
7. Щуров В.А. Движение акустической энергии в океане. Владивосток: ИП ХЦ ТИГ ДВО РАН, 2019. 204 с.
8. Ильичев В.И., Кулешов В.И., Куянова М.В., Щуров В.А. Взаимодействие потоков мощности подводных окружающих шумов и локального источника // Акуст. журн. 1991. Т. 37, № 1. С. 99–103.
9. Shchurov V.A., Pyichev V.I., Kuleshov V.P., Kuyanova M.V. The interaction of energy flows of underwater ambient noise and local source // J. Acoust. Soc. Am. 1991. Vol. 90 (2), pt 1. P. 1002–1004.
10. Shchurov V.A. Coherent and diffusive fields of underwater acoustics ambient noise // J. Acoust. Soc. Am. 1991. Vol. 90 (2). P. 1002–1004.
11. Касаткин Б.А. и др. Акустика мелкого моря в скалярно-векторном описании. Владивосток: ИПИМТ ДВО РАН, 2019. 359 с.
12. Баранова Н.Б., Зельдович Б.Я. Дислокации поверхностей волнового фронта и нули амплитуды // ЖЭТФ. 1981. Т. 80, № 5. С. 1789–1797.
13. Журавлев В.А., Кобозев И.К., Кравцов Ю.А. Дислокации фазового фронта в океаническом волноводе и их проявление в акустических измерениях // Акуст. журн. 1989. Т. 35, № 2. С. 260–265.
14. Елисеевнин В.А., Тужилкин Ю.И. Поток акустической мощности в волноводе // Акуст. журн. 2001. Т. 47, № 6. С. 781–788.
15. Tichy J. Basic intensity flow relationship acoustic fields // Inter-noise 84. Honolulu, USA. 1984. Vol II. P. 1149–54.
16. Щуров В.А., Кулешов В.П., Ткаченко Е.С. Интерференция фазового спектра широкополосного точечного источника в мелком море // Докл. 22-й сессии русского акустического сообщества (ГЕОС, Москва). 2010. № 2. С. 248–251.
17. Shchurov V.A. Peculiarities of real shallow sea wave-guide vortex structure // J. Acoust. Soc. Am. 2019. Vol 145, No. 1. P. 525–530.
18. Рытов С.М. Случайные процессы. Ч. I. М.: Наука, 1976. 494 с.

Для цитирования:

Щуров В.А., Щеглов С.Г., Ляшков А.С., Ткаченко Е.С. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКЕАНЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВЕКТОРНОЙ ПРИРОДОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2 (36). С. 47–56. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_05.

Об авторах

ЩУРОВ Владимир Александрович – профессор, д.ф.-м.н., со-ветник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (www.poi.dvo.ru), лаборатория статистической гидроакустики

Научные интересы: векторная акустика океана

E-mail: shchurov@poi.dvo.ru

Тел. +7(423)231-21-01

ID eLibrary.ru: 27462

ЩЕГЛОВ Сергей Георгиевич – ведущий инженер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (www.poi.dvo.ru), лаборатория статистической гидроакустики

Научные интересы: экспериментальные исследования океана методами векторной акустики, обработка экспериментальных данных

E-mail: ssg57@mail.ru

Тел. +7(423)231-21-01

ЛЯШКОВ Алексей Сергеевич – ведущий инженер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (www.poi.dvo.ru), лаборатория статистической гидроакустики

Научные интересы: математическая обработка сигналов в подводной векторной акустике

E-mail: aslsh@mail.ru

Тел. +7(423)231-21-01

ТКАЧЕНКО Елена Станиславовна – ведущий инженер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева ДВО РАН (www.poi.dvo.ru), лаборатория статистической гидроакустики

Научные интересы: экспериментальные исследования океана методами векторной акустики, обработка экспериментальных данных

E-mail: 525065@mail.ru

Тел. +7(423)231-21-01



OCEAN FUNDAMENTAL PHENOMENA DEFINED BY VECTOR NATURE OF ACOUSTIC INTENSITY

V.A. Schurov, S.G. Scheglov, A.S. Lyashkov, E.S. Tkachenko

The article covers theoretical and experimental acoustic studies of deep oceans and shallow sea based on the concept of the vector-phase method. For the first time, such fundamental phenomena like compensation of opposing energy flows, curls of acoustic energy flux vector, anisotropy of low and medium frequency underwater acoustic noise are detected and investigated, processing algorithms based on the fourth statistical moment are designed, noise-sustainability of a combined receiving systems is determined relative to the quadrature detector, and an unparalleled receiving combined systems are designed. In addition, the article presents a survey of phenomena associated with the vector nature of the energy-flux density (intensity vector).

Keywords: vector-phase method, vector of acoustic intensity, curl of acoustic intensity, compensation of energy flows, the fourth statistical moment.

References

1. Zakharov L.N., Rzhvekin S.N. Vektorno-fazovyye izmereniya v akusticheskom pole. Akust. zhurn. 1974. Vol. 20, No. 3. P. 52–61.
2. Shchurov V.A. Vektornaya akustika okeana. Vladivostok: Dalnauka. 2003. 307 p.
3. Shchurov V.A. Dvizheniye Akusticheskoy energii v okeane. Vladivostok. FEB RAS. 2019. 204 p.
4. Il'ichev V.I., Kuleshov V.I., Kuyanov M.V., Shchurov V.A. Vzaimod-eystviye potokov moshchnosti podvodnykh okruzhayushchikh shumov i lokal'nogo istochnika. Akust. zhurn. 1991. Vol. 37, No. 1. P. 99–103.
5. Shchurov V.A., Ilyichev V.I., Kuleshov V.P., Kuyanov M.V. The interaction of energy flows of underwater ambient noise and local source. J. Acoust. Soc. Am. 1991. Vol. 90 (2), pt 1. P. 1002–1004.
6. Zhuravlev V.A., Kobozev I.K., Kravtsov YU.A. Dislokatsii fazovogo fronta v okeanicheskom volnovode i ikh proyavleniye v akusticheskikh izmereniyakh. Akust. zhurn. 1989. Vol. 35. No. 2. P. 260–265.
7. Yeliseyevnin V.A., Tuzhilkin YU.I. Potok akusticheskoy moshchnosti v volnovode. Akust. zhurn. 2001. Vol. 47. No.6. P. 781–788.
8. Rytov S.M. Sluchaynyye protsessy. Chast' I. M.: Nauka. 1976. 494 p..

Recommended citation:

Shchurov V.A., Shcheglov S.G., Lyashkov A.S., Tkachenko E.S. OCEAN FUNDAMENTAL PHENOMENA DEFINED BY VECTOR NATURE OF ACOUSTIC INTENSITY. Underwater investigation and robotics. 2021. No. 2(36). P. 47–56. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_05.

About the authors

SCHUROV Vladimir Aleksandrovich, Dr.Sc., professor, adviser V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: vector acoustics of the ocean
Phone: +7(423)231-21-01
E-mail: shchurov@poi.dvo.ru
ID eLibrary.ru: 27462

SCHEGLOV Sergej Georgievich, lead engineer V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: experimental studies of the ocean using vector acoustics, processing of experimental data
E-mail: ssg57@mail.ru
Phone: +7(423)231-21-01

LYASHKOV Aleksey Sergeevich, lead engineer V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: mathematical signal processing in underwater vector acoustics
E-mail: aslsh@mail.ru
Тел. +7(423)231-21-01

TKACHENKO Elena Stanislavovna, lead engineer V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: experimental studies of the ocean using vector acoustics, processing of experimental data
E-mail: 525065@mail.ru
Тел. +7(423)231-21-01

К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХСТОРОННИХ ДИСКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ФОНЕ АКУСТИЧЕСКОГО ЭКРАНА

И.Р. Бирюков, М.Н. Петухова

Необходимость расширения полосы рабочих частот для решения задач обнаружения подводных объектов при учете физических основ построения электроакустических преобразователей и антенной техники вынуждает рассматривать варианты использования электроакустических приемных преобразователей вплоть до частоты резонанса их механической колебательной системы и выполнять плотную компоновку преобразователей внутри антенны. При реализации подобного рода технических решений влияние взаимодействия преобразователей друг с другом на конечные параметры антенны становится значительным, что обуславливает необходимость учета этого взаимодействия при проектировании антенной решетки.

Учет взаимного влияния преобразователей на полевые характеристики антенной решетки в общем случае происходит посредством расчета полного механического сопротивления каждого преобразователя, для получения которого необходимы собственные и взаимные сопротивления излучения.

В статье рассчитана и проанализирована частотная зависимость собственного и взаимного сопротивлений излучения двух преобразователей в зависимости от моды колебаний, расстояния между ними (для взаимного сопротивления излучения), расстояния до экрана и типа тыльного экрана. Результаты расчета показывают существенное влияние межэлементного расстояния и типа импедансного экрана на взаимное сопротивление излучения. Можно сделать вывод о необходимости учета взаимодействия преобразователей на фоне импедансного экрана при межэлементном расстоянии менее $0,5\lambda \dots 0,6\lambda$ и при работе вблизи резонанса вне зависимости от моды колебаний.

Ключевые слова: сопротивление излучения, акустический импедансный экран.

Существенная функциональная нагруженность современных гидроакустических станций (ГАС) обуславливает тенденцию к усложнению антенной техники и прочих судовых устройств. В частности, для обнаружения маломерных объектов потребовалось включение в состав ГАС антенн, способных излучать и принимать в диапазоне частот, ранее не востребованном. Стремление понизить уровень собственных шумов обусловило модернизацию функциональных узлов судна, таких как система охлаждения, двигатели, гребные винты, насосы балластных цистерн и т.д., однако при этом спектр шумов, порождаемых ими, сместился в область более низких частот. Таким образом, изменился общий «шумовой профиль» современных подводных лодок и надводных судов. В связи с этим требования к гидроакустическим антен-

нам, касающиеся их рабочей полосы частот, также подверглись пересмотру в сторону расширения частотного диапазона. Физические принципы построения электроакустических преобразователей (ЭАП), входящих в антенные решетки, таковы, что расширение полосы рабочих частот путем повышения частоты резонанса приводит к уходу взаимосвязанных с частотной характеристикой чувствительности параметров, и в таком случае не всегда возможно обеспечить требования технического задания. Поэтому возможным вариантом решения задачи является обеспечение работы ЭАП вплоть до частоты резонанса, что требует учета межэлементного взаимодействия преобразователей в антенне. Кроме того, при разработке антенных решеток часто существует необходимость достаточно близкого расположения элементов

решетки, возникновение при этом сильной взаимной связи между элементами может критически сказаться на характеристиках всей антенны.

Как правило, большинство методов расчета взаимной связи основаны на нахождении матрицы связи, которая может быть вычислена исходя из значений собственного и взаимного сопротивлений между преобразователями [1].

История исследования вопроса межэлементного взаимодействия в антенне началась в начале XX в. с выхода монографии лорда Рэля «Теория звука», в которой впервые были приведены выражения, позволяющие количественно определять акустическое поле давлений идеализированной поршневой диафрагмы и ее собственное сопротивление излучения. По приведенному Рэлеем алгоритму расчета впервые можно было количественно оценить уровень межэлементного взаимодействия.

Несмотря на успехи в развитии теоретической акустики, практический расчет акустических параметров поля с помощью полученных выражений оказался невыполним в силу ограниченных возможностей вычислительной техники того времени. По этой причине в XX в. усилия ученых были в основном направлены на поиски приближенных решений для нахождения собственного и взаимного сопротивлений излучения элементарных составляющих антенны.

В ряде работ [2–4] были получены аналитические выражения расчета реальной и мнимой частей собственного и взаимного сопротивлений излучения поршней различной формы в жестком экране. Исследование влияния распределения колебательной скорости вдоль поверхности диска, заключенного в бесконечный жесткий экран, на собственное и взаимное сопротивления излучения впервые исследовалось Д.Т. Портером в работе [5]. Перечисленные работы имеют общую черту, в них выражения для расчета межэлементного взаимодействия получены в предположении идеальности граничных условий: источники/приемники колебаний работают одной стороной, поскольку заключены в бесконечный жесткий экран.

Для решения ряда практических задач представляет интерес расчет сопротивлений излучения реальных преобразователей, нагруженных с обеих сторон, в их фактических условиях эксплуатации. В качестве такого преобразователя рассмотрим конструкцию из двух круглых пластин (дисков), расположенных вблизи акустического экрана.

Рассмотрим два преобразователя, лежащих в плоскости, параллельной плоскости бесконечного акустического экрана на расстоянии h от него.

Пусть (x', y', z') – координаты точки наблюдения, (x_i, y_i) – координаты преобразователя (элемента) площадью S_i в плоскости xOy . Давление, развиваемое преобразователем в точке наблюдения, будет результатом сложения давлений, создаваемых прямой волной $p(r)_d$ и волной $p(r)_r$, отраженной от экрана [6].

$$p(r) = p(r)_d + p(r)_r, \quad (1)$$

$$p(r)_d = \frac{ik\rho c w_1}{2\pi} \int_{S_i} \frac{A_i e^{ikr_i}}{r_i} dS_i,$$

$$p(\bar{r})_r = \frac{ik\rho c w_1}{2\pi} \int_{S_i} \frac{A_i e^{ikr_{ir}}}{r_{ir}} dS_i,$$

r_i – расстояние от центра преобразователя до точки наблюдения, w_1 – колебательная скорость преобразователя, A_i – коэффициент амплитудно-фазового распределения, ρc – волновое сопротивление среды, k – волновое число, S_i – площадь поверхности преобразователя.

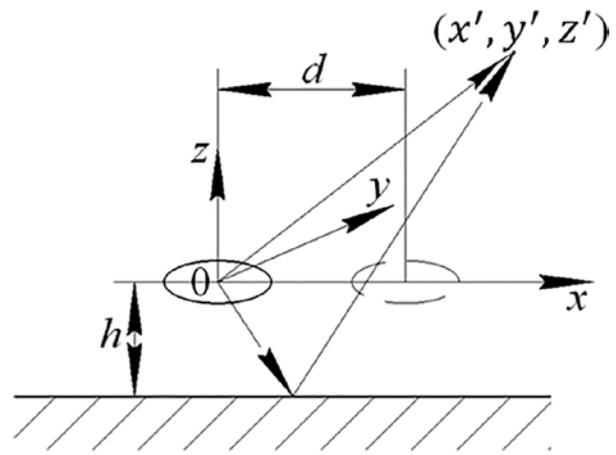


Рис. 1. Схема модели

С учетом разложения сферических волн по плоским и записи характеристики направленности преобразователя $R_e(\theta)$, лежащего в плоскости xOy , через интеграл от давления по площади поверхности преобразователя [6] выражение (1) примет вид:

$$p(\bar{r}) = K \int_0^{\frac{\pi}{2} - i\infty} \int_0^{2\pi} D(\theta, \varphi) E'(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta,$$

где θ, φ – углы, определяющие направление в пространстве в сферической системе координат,

$$D(\theta, \varphi) = R_e(\theta) [V(\theta, \varphi) e^{H'(\theta)} + 1],$$

$$H'(\theta) = ik [2h \cos \theta], \quad E'(\theta, \varphi) = e^{XYZ'(\theta, \varphi)},$$

$$XYZ'(\theta, \varphi) = ik [(x') \sin\theta \cos\varphi + (y') \sin\theta \sin\varphi + (z') \cos\theta],$$

$$K = \frac{-k^2 \rho c w_1 \cdot S_{ef}}{4\pi^2}, \quad S_{ef} = \int_{S_i} a(x, y) dS_i,$$

где $a(x, y)$ – амплитудное распределение вдоль поверхности преобразователя, $V(\theta, \varphi)$ – коэффициент отражения от экрана,

$V(\theta, \varphi) = \frac{Z_e(\theta, \varphi) - Z_{sr}}{Z_e(\theta, \varphi) + Z_{sr}}$, $Z_e(\theta, \varphi)$ – импеданс экрана, Z_{sr} – импеданс среды.

После переноса точки наблюдения на плоскость $x\theta y$ получим $z' = 0$, $x' = x_i + d$, d – расстояние между элементами, $y' = y_j$ – координаты второго, идентичного первому, преобразователя, тогда давление, создаваемое излучением i -го преобразователя на j -м:

$$p(\bar{r}) = K \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} D(\theta, \varphi) E(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta,$$

$$E(\theta, \varphi) = e^{XY_i(\theta, \varphi)},$$

$$XY_i(\theta, \varphi) = ik \left[(x_i) \sin\theta \cos\varphi + (y_i) \sin\theta \sin\varphi \right] + M(\theta, \varphi),$$

$$M(\theta, \varphi) = ikd \sin\theta \cos\varphi.$$

Акустическая мощность, излучаемая преобразователем j в присутствии незаторможенного i -го преобразователя может быть записана [6]:

$$W_j = \frac{|w_1|^2}{2} \int_{S_j} \frac{p(\bar{r})}{w_1} A_j^* dS_j,$$

сопротивление излучение элемента:

$$Z_j = \frac{2W_j}{|w_1|^2} = \int_{S_j} \frac{p(\bar{r})}{w_1} A_j^* dS_j,$$

где w_1 – колебательная скорость i -го преобразователя, A_j^* – комплексно-сопряженное распределение колебательной скорости на поверхности j -го преобразователя, $p(\bar{r})$ – давление, развиваемое i -м преобразователем на поверхности j -го преобразователя, S_j – площадь j -го преобразователя.

Сопротивление излучения любого из двух идентичных преобразователей симметричной конструкции:

$$Z_j = Z_i = \frac{2K}{w_1} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} D(\theta, \varphi) C(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta,$$

$$C(\theta, \varphi) = \int_{S_j} A_j^* E(\theta, \varphi) dS_j.$$

С учетом записи характеристики направленности преобразователя через интеграл от давления по площади поверхности преобразователя запишем предыдущее выражение в виде:

$$Z_j = Z_i = \frac{2KS_{ef}}{w_1} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} R_e(\theta) D(\theta, \varphi) e^{M(\theta, \varphi)} \sin\theta d\varphi d\theta$$

Так как $\int_0^{2\pi} e^{M(\theta, \varphi)} d\varphi = 2\pi J_0(kd \sin\theta) = B(\theta)$, $J_0(kd \sin\theta)$ – функция Бесселя нулевого порядка, то:

$$Z_j = Z_i = \frac{2KS_{ef}}{w_1} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B(\theta) R_e(\theta) D(\theta, \varphi) \sin\theta d\varphi d\theta.$$

Разобьем контур интегрирования по углу θ на два участка: $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ и $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - i\infty$. На втором участке интегрирования $\theta = \frac{\pi}{2} - i\theta'$: $i \cdot \sin\theta' = \cos\theta$, $\cos\theta' = \sin\theta$, $-id\theta = d\theta'$.

$$Z_j = Z_i = \frac{2KS_{ef}}{w_1} \int_0^{2\pi} [T(\varphi) - iT'(\varphi)] d\varphi, \quad (2)$$

$$T(\varphi) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} B(\theta) R_e(\theta) D(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta,$$

$$T'(\varphi) = \int_0^{\infty} B(\theta') R_e(\theta') D(\theta', \varphi) \cos\theta' d\theta'.$$

Используя (2), можно рассчитать сопротивление излучения любого преобразователя, работающего в составе плоской антенны на фоне импедансного экрана.

Рассчитаем собственное сопротивление излучения Z_{ii} (при $d = 0$) и взаимные сопротивления излучения Z_{ij} преобразователей для следующих типов колебаний пластин преобразователей:

- 1) поршневых;
- 2) соответствующих диску с опертым краем;
- 3) соответствующих диску с зажатым краем.

Распределение колебательной скорости по поверхности и характеристики направленности пластин указанных мод колебаний приведены в [5]. В качестве тыльного акустического экрана в процессе расчетов будем использовать абсолютно мягкий, абсолютно жесткий и два реальных экрана – поглощающий и отражающий. Абсолютно мягкий и жесткий экраны – математическая абстракция с чисто активными коэффициентами отражения, равными -1 и 1 соответственно. Поглощающий и отражающий экраны имеют комплексные частотно-зависимые коэффициенты отражения. За счет ряда конструктивных решений значительная часть энергии звуковой волны в первом случае рассеивается внутри, а во втором – отражается от его поверхности.

Рассмотрим изменение собственного сопротивления излучения двояной пластины при размещении ее вблизи импедансного экрана. На графиках (рис. 2–4) представлена зависимость отношений активного $r_{ii} = Re(Z_{ii})$ (сплошные линии) и реактивного $x_{ii} = Im(Z_{ii})$ (пунктирные линии) собственных сопротивлений излучения преобразователя вблизи экрана к соответственно активной и реактивной составляющим собственного сопротивления излучения преобразователя в свободном поле, по оси абсцисс – волновое расстояние до экрана.

Рассмотрены случаи поршневого колебания пластин преобразователя (рис. 2), колебания преобразо-

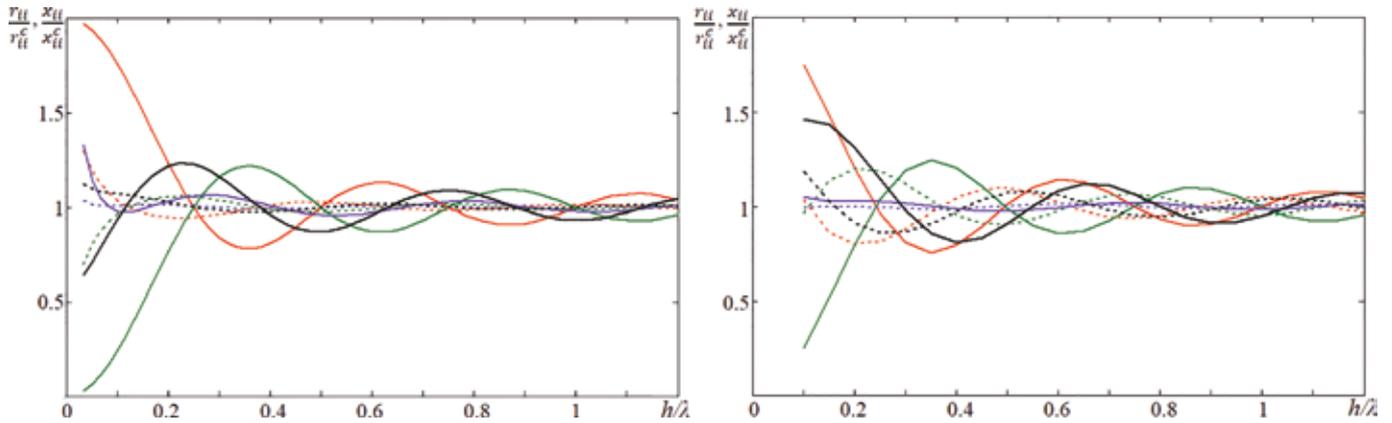


Рис. 2. Относительные активные и реактивные собственные сопротивления излучения преобразователя, находящегося вблизи различных экранов (тип колебаний преобразователя – поршневой)

вателя, соответствующие моде колебаний опертой по контуру пластины (рис. 3) и моде колебаний зажатой по контуру пластины (рис. 4) при расположении преобразователя вблизи различных экранов: абсолютно жесткого (красные линии), абсолютно мягкого (зеленые линии), поглощающего (фиолетовые линии), от-

ражающего (черные линии). Расчеты проводились на частотах $2a/\lambda \approx 0,1$ (левые графики) и $2a/\lambda \approx 0,3$ (правые графики), $2a$ – диаметр пластинчатого преобразователя. Из графиков следует, что с увеличением волнового расстояния до экрана собственные сопротивления преобразователя вблизи различных экранов

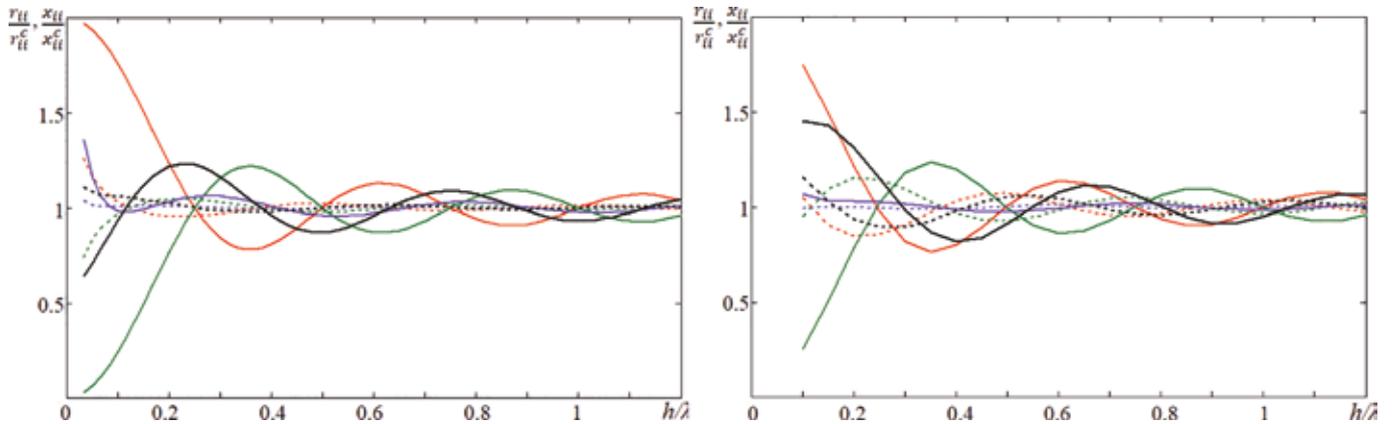


Рис. 3. Относительные активные и реактивные собственные сопротивления излучения преобразователя, находящегося вблизи различных экранов (тип колебаний преобразователя – опертая пластина)

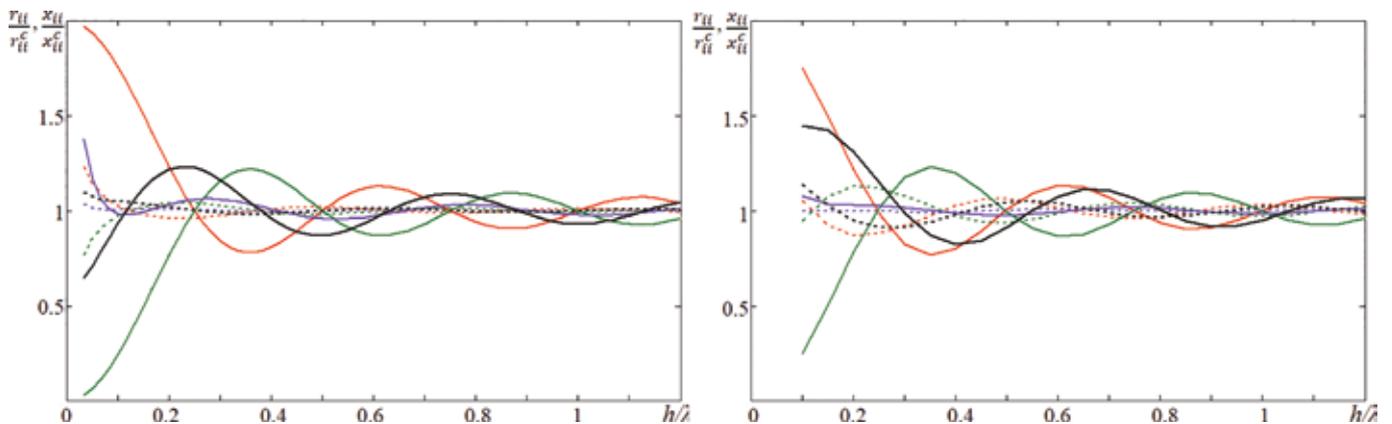


Рис. 4. Относительные активные и реактивные собственные сопротивления излучения преобразователя, находящегося вблизи различных экранов (тип колебаний преобразователя – зажатая пластина)

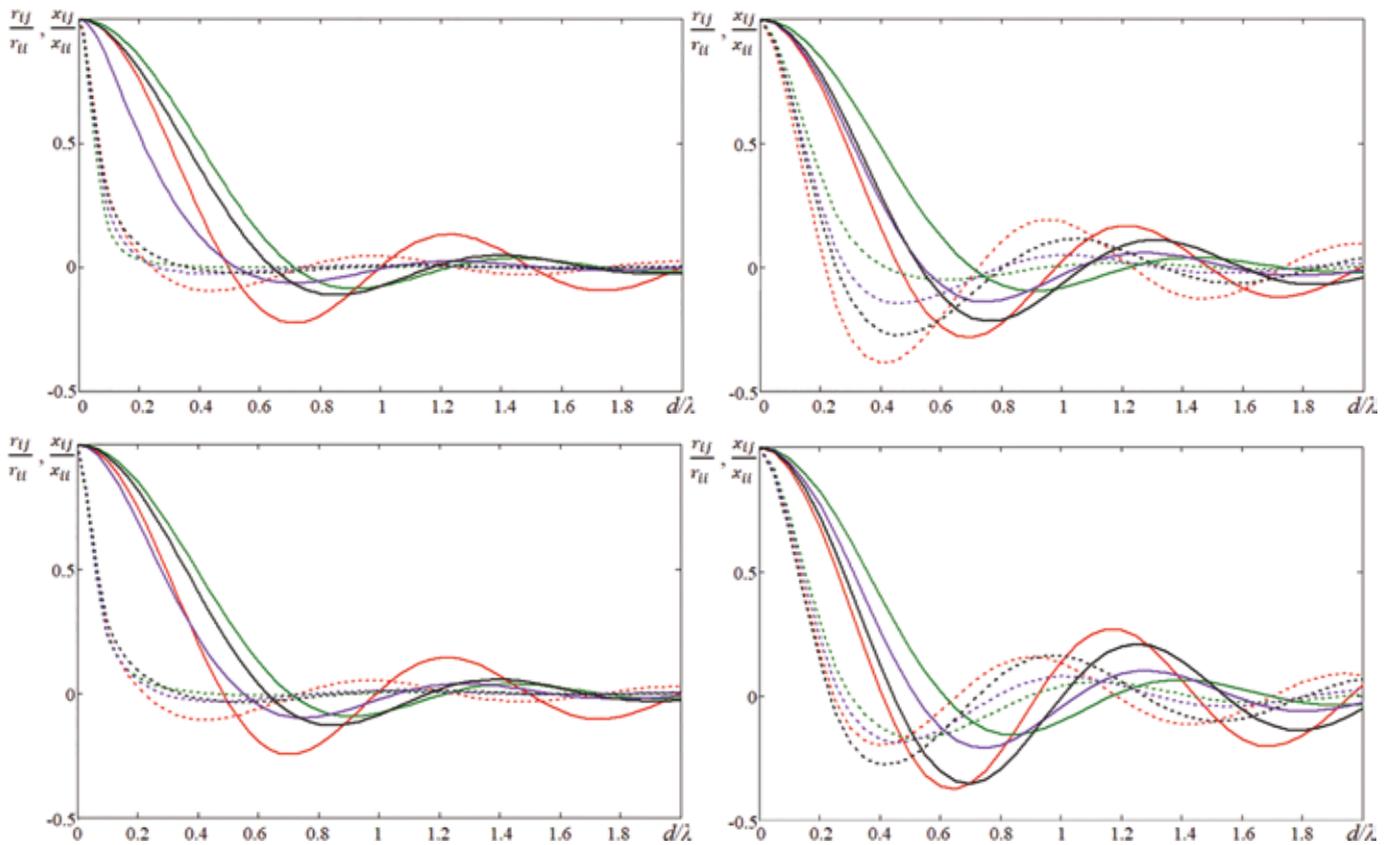


Рис. 5. Нормированные взаимные сопротивления излучения пластинчатых преобразователей при расположении их вблизи различных импедансных экранов (амплитудное распределение соответствует колебаниям поршня), расстояние до экрана $h/\lambda=0,05$ (верхние графики) и $h/\lambda=0,1$ (нижние)

стремятся к собственному сопротивлению излучения преобразователя в свободном поле. Чем ближе преобразователь к экрану (меньше волновое расстояние от преобразователя до экрана), тем большее влияние оказывает экран на сопротивление излучения. В присутствии экранов различных типов мода колебания преобразователя практически не оказывает влияния на величину r_{ii} , при этом незначительно влияет на величину x_{ii} во всем диапазоне частот.

Аналогичным образом рассмотрим характер кривых взаимного сопротивления излучения любого из двух идентичных преобразователей, расположенных на фоне акустического экрана. На рис. 5–7 представлена зависимость отношений активного (сплошные линии) и реактивного (пунктирные линии) взаимных сопротивлений излучения преобразователя вблизи экрана соответственно к активной и реактивной составляющим собственного сопротивления излучения (при тех же условиях) от волнового расстояния между преобразователями. Как и ранее, рассмотрены случаи поршневого колебания преобразователя (рис. 5), колебания преобразователя, соответствующие моде ко-

лебаний опертой по контуру пластины (рис. 6) и моде колебаний зажатой по контуру пластины (рис. 7) при расположении преобразователя вблизи различных экранов: абсолютно жесткого (красные линии), абсолютно мягкого (зеленые линии), поглощающего (фиолетовые линии), отражающего (черные линии). Пусть диаметр пластинчатого преобразователя равен $2a$ и располагается он на расстояниях $h/\lambda \approx 0,05$ (верхние графики) и $2h/\lambda \approx 0,1$ (нижние графики) от экрана. Резонанс механической системы пластинчатых преобразователей наблюдается при $2a/\lambda = 0,3 \dots 0,5$. Расчеты проводились на частотах $2a/\lambda \approx 0,1$ (левые графики) и $2a/\lambda \approx 0,3$ (правые графики).

Нормированные взаимные сопротивления излучения на нижней частоте рабочего диапазона ($2a/\lambda \approx 0,1$) практически не зависят от моды колебаний и при $d/\lambda > 0,6$ – от расстояния до экрана. Вблизи резонанса значения нормированного сопротивления излучения, как и ожидалось, превышают значения, полученные для $2a/\lambda \approx 0,1$, активная составляющая взаимного сопротивления излучения практически не зависит от моды колебаний во всем диапазоне частот, реактивная – зависит.

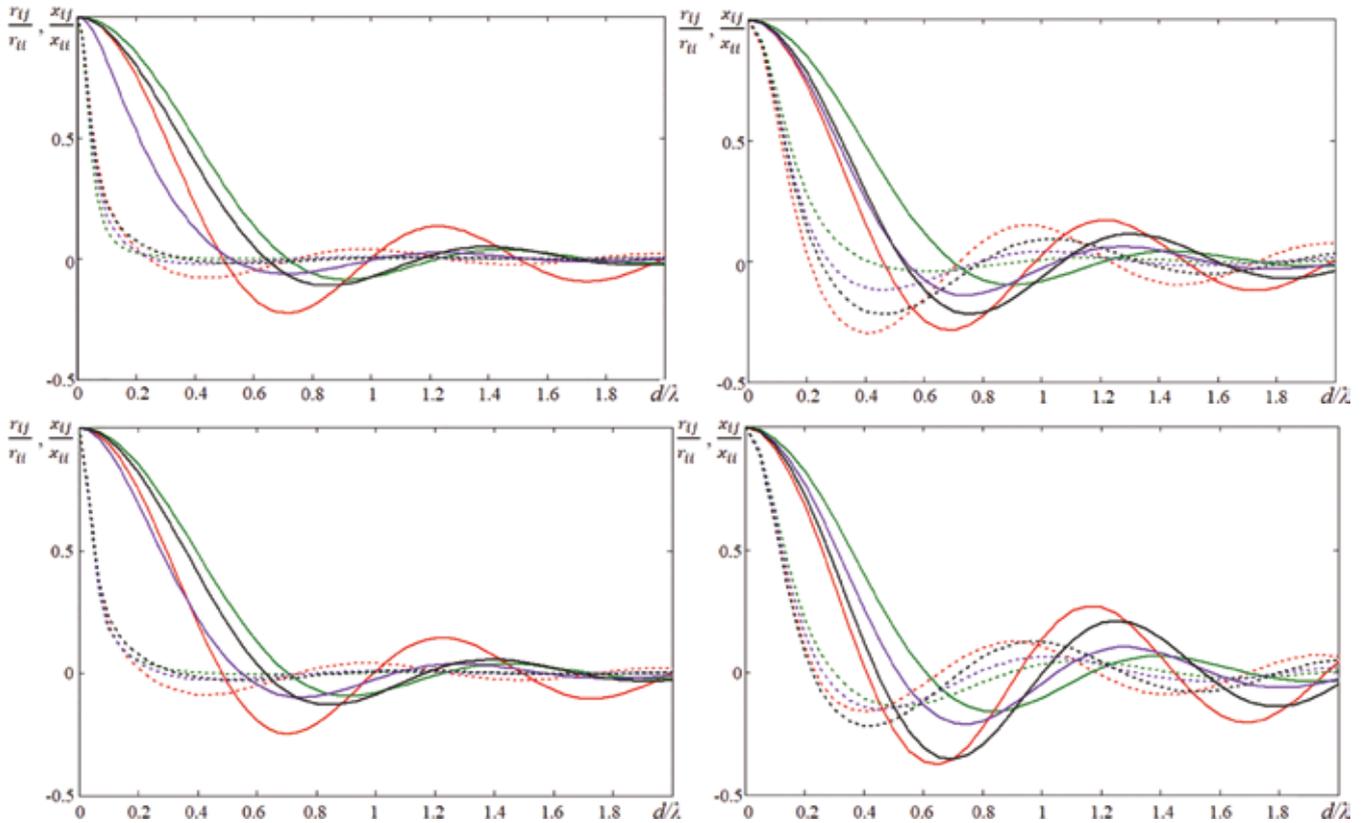


Рис. 6. Нормированные взаимные сопротивления излучения пластинчатых преобразователей при расположении их вблизи различных импедансных экранов (амплитудное распределение соответствует колебаниям опертой по краям пластины), расстояние до экрана $h/\lambda=0,05$ (верхние графики) и $h/\lambda=0,1$ (нижние)

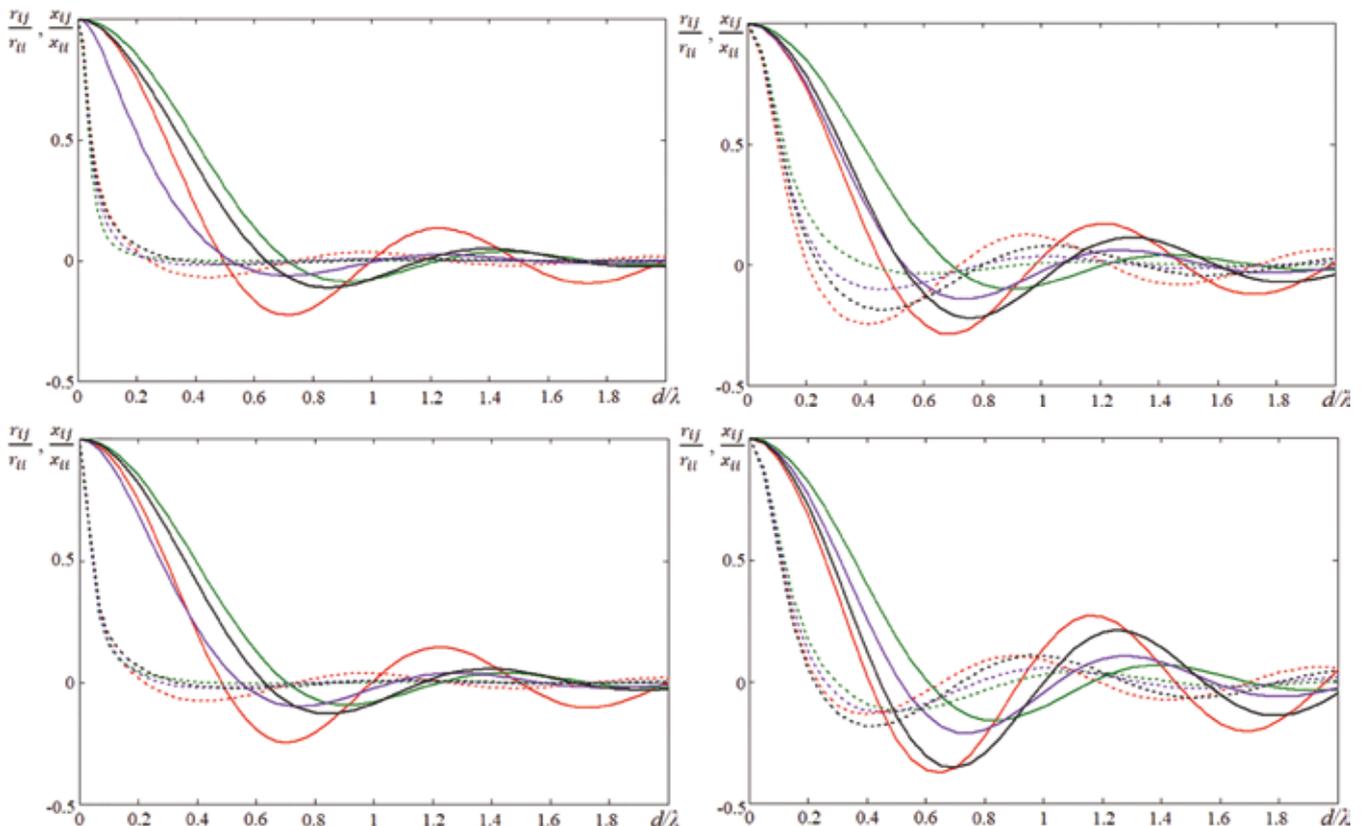


Рис. 7. Нормированные взаимные сопротивления излучения пластинчатых преобразователей при расположении их вблизи различных импедансных экранов (амплитудное распределение соответствует колебаниям зажатой пластины), расстояние до экрана $h/\lambda=0,05$ (верхние графики) и $h/\lambda=0,1$ (нижние)

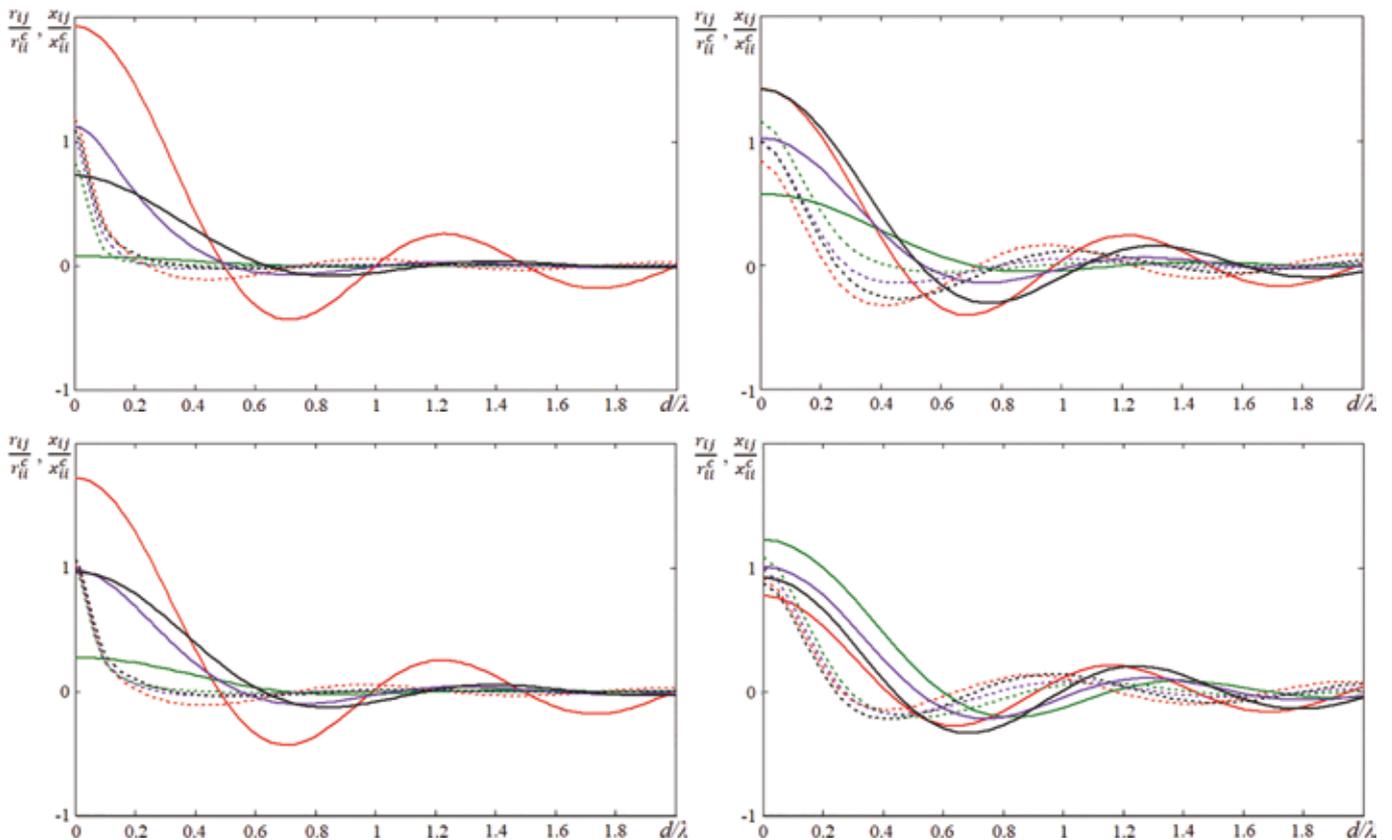


Рис. 8. Нормированные взаимные сопротивления излучения пластинчатых преобразователей при расположении их вблизи различных импедансных экранов (амплитудное распределение соответствует колебаниям поршня), расстояние до экрана $h/\lambda=0,05$ (верхние графики) и $h/\lambda=0,1$ (нижние)

На рис. 8 представлены графики взаимного сопротивления излучения, аналогичные приведенным на рис. 5–7 для случая поршневых колебаний пластин, нормирование производилось к активной и реактивной составляющим собственного сопротивления излучения преобразователя в свободном поле. Как и ожидалось, из графиков следует, что по мере удаления от экрана собственное сопротивление излучения преобразователя (при $d/\lambda=0$) приближается к значению собственного сопротивления излучения в свободном поле. При колебаниях на других модах характер кривых идентичный.

Из анализа графиков рис. 5–8 следует, что взаимное сопротивление излучения вдали от резонанса при расстояниях между преобразователями $d/\lambda > 0,6$ стремится к нулю (за исключением случая расположения преобразователя вблизи жесткого экрана), вблизи резонанса такое наблюдается при гораздо больших расстояниях между преобразователями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено выражение, позволяющее получить собственное и взаимное сопротивление излучения элемента на фоне акустического экрана. Из анализа результатов расчета по полученному выражению следует, что проектирование акустических антенн, расположенных вблизи реально используемых акустических покрытий, имеющих «плотную» решетку преобразователей ($d/\lambda < 0,5 \dots 0,6$) и работающих на частотах вплоть до частоты резонанса входящих в нее преобразователей, требует учета межэлементного взаимодействия. Для антенн, расположенных вблизи покрытия, по свойствам приближающегося к абсолютно жесткому, учет взаимодействия преобразователей при расчете полевых характеристик необходим всегда в практически реализуемых конструкциях, вне зависимости от рабочих частот и расстояний между элементами антенны. Приведенное в статье выражение для сопротивления излучения может быть использовано для получения колебательных скоростей преобразователей для последующего расчета полевых характеристик антенн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вендик О.Г., Козлов Д.С. Универсальный метод расчета взаимного импеданса между элементами антенной решетки // III Всерос. науч.-техн. конф. «Микроэлектроника СВЧ»: сб. тр. СПб, 2014. С. 263–267.
2. Pritchard H.L. Mutual acoustic impedance between radiators in an infinite rigid plane // JASA. 1960. Vol. 32, No. 6. P. 730–737.
3. Klapman S.J. Interaction impedance of a system of circular pistons // JASA. 1940. Vol. 11. P. 289–295.
4. Arase E. Mutual radiation impedance of square and rectangular pistons in a rigid infinite baffle // JASA. 1964. Vol. 36, No. 8. P. 1521–1525.
5. Porter D.T. Self- and mutual radiation impedance and beam patterns for flexural disks in a rigid plane // JASA. 1964. Vol. 36, No. 6. P. 1154–1161.
6. Смаришев М.Д. Элементы теории направленности гидроакустических антенн: учеб. пособие. СПб.: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 144 с.

Об авторах

БИРЮКОВ Игорь Романович, начальник Акустического научно-исследовательского отделения

АО «Концерн «Океанприбор»

Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 46

Область научных интересов: разработка гидроакустических преобразователей и антенн, гидроакустические измерения

Тел.: +7 (812) 499-99-52

E-mail: i698@yandex.ru

ПЕТУХОВА Марина Николаевна, ведущий инженер
АО «Концерн «Океанприбор»

Адрес: 197376, Россия, Санкт-Петербург, Чкаловский пр., д. 46

Область научных интересов: расчет полевых характеристик гидроакустических преобразователей и антенн

Тел.: +7 (812) 499-74-11

E-mail: mpn0@yandex.ru

Для цитирования:

Бирюков И.Р., Петухова М.Н. К ВОПРОСУ О СОПРОТИВЛЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХСТОРОННИХ ДИСКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ФОНЕ АКУСТИЧЕСКОГО ЭКРАНА // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2 (36). С. 57–65. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_06.



ON THE QUESTION OF RADIATION IMPEDANCE OF TWO-SIDED DISK TRANSDUCERS LOCATED NEAR THE ACOUSTIC SCREEN

I.R. Biriukov, M.N. Petukhova

The need to expand the operating frequency band for solving problems of underwater objects detection, taking into account the physical basis of constructing electroacoustic transducers and antenna technology, forces us to consider options for using electroacoustic receiving transducers up to the resonance frequency of their mechanical oscillatory systems and performing a tight arrangement of the transducers inside the antenna. When implementing this kind of technical solution, the influence of the interaction of transducers on the antenna's final parameters becomes significant, making it necessary to take this interaction into account when designing the antenna array.

Consideration of the mutual influence of transducers on the field characteristics of the antenna array, in general, occurs by calculating the total mechanical resistance of each transducer, which requires self- and mutual radiation resistances.

In the article, we calculate and analyze the frequency dependence of self- and mutual radiation resistances of two transducers depending on the oscillation mode, the distance between them (for mutual resistance), the distance to the screen, and the type of impedance screen. The calculation results show a significant influence of the element spacing and the type of impedance screen on mutual radiation resistance. It can be concluded that it is necessary to consider the transducers' interaction near the impedance screen when inter-element distance is less than $0.5\lambda \dots 0.6\lambda$ and when operating near the resonance, regardless of the oscillation mode.

Keywords: radiation impedance, acoustic impedance screen.

References

1. Vendik, O.G.; Kozlov, D.S. *Universal'nyj metod rascheta vzaimnogo impedansa mezhdru elementami antennoj reshetki. III Vseros. nauch.-tekhn. konf. «Mikroelektronika SVCH»: sb. tr.* SPb, 2014. P. 263–267.
2. Pritchard, H.L. Mutual acoustic impedance between radiators in an infinite rigid plane. *JASA*. 1960. Vol. 32, No. 6. P. 730–737.
3. Klapman, S.J. Interaction impedance of a system of circular pistons. *JASA*. 1940. Vol. 11. P. 289–295.
4. Arase, E. Mutual radiation impedance of square and rectangular pistons in a rigid infinite baffle. *JASA*. 1964. Vol. 36, No. 8. P. 1521–1525.
5. Porter, D.T. Self- and mutual radiation impedance and beam patterns for flexural disks in a rigid plane. *JASA*. 1964. Vol. 36, No. 6. P. 1154–1161.
6. Smaryshev, M.D. *Elementy teorii napravlenosti gidroakusticheskikh antenn: ucheb. posobie.* SPb.: LETI, 2004. 144 p.

About the authors

BIRIUKOV Igor Romanovich, head of the Acoustic Research Department

Concern Oceanpribor JSC

Address: 46, Chkalovsky Ave., Saint-Petersburg, 197376, Russia

Research interests: development of hydroacoustic transducers and antennas, hydroacoustic measurements

Phone: +7 (812) 499-99-52

E-mail: i698@yandex.ru

PETUKHOVA Marina Nikolaevna, lead engineer

Concern Oceanpribor JSC

Address: 46, Chkalovsky Ave., Saint-Petersburg, 197376, Russia

Research interests: calculation of field characteristics of hydroacoustic transducers and antennas

Phone: +7 (812) 499-74-11

E-mail: mpn0@yandex.ru

Recommended citation:

Biriukov I.R., Petukhova M.N. ON THE QUESTION OF RADIATION IMPEDANCE FOR TWO-SIDED DISK TRANSDUCERS LOCATED NEAR THE ACOUSTIC SCREEN. *Underwater investigation and robotics*. 2021. No. 2(36). P. 57–65. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_06.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ВОЛНАМИ В ГЛУБОКОМ МОРЕ

С.Б. Козицкий, И.С. Козицкая

Исследуются электромагнитные поля, индуцированные движениями проводящей жидкости бесконечной глубины во внешнем магнитном поле. Исходные уравнения Максвелла сформулированы через магнитный вектор Герца, и получены общие решения для электромагнитных полей и плотности тока для некоторого семейства потенциальных полей скорости жидкости. В частности, изучены электромагнитные эффекты, связанные с радиально-симметричной системой прогрессивных поверхностных волн в глубоком море, порожденной либо подводными осциллирующими источниками (точечный монополярный источник, вертикально колеблющаяся сфера), либо дисперсионным распадом изначально локализованных возмущений поверхности моря (волны Коши–Пуассона). Для начального возмущения поверхности жидкости специального вида получены аналитические выражения для электромагнитных полей в воздухе, индуцированных волнами Коши–Пуассона. Для этих решений рассмотрены их различные асимптотики, исследовано поведение полученных решений в случае больших времен и расстояний от начала координат. Оказалось, что вариации электромагнитного поля в воздухе на достаточно большой высоте над океаном могут быть вероятными предвестниками волн цунами. Результаты могут быть полезны в разработке систем детектирования волн цунами дистанционными методами.

Ключевые слова: поверхностные волны, волны цунами, вариации электромагнитного поля, магнитная гидродинамика.

Введение

Задача исследования состоит в математическом описании вариаций электромагнитных полей, индуцированных радиально-симметричной системой прогрессивных поверхностных волн на поверхности проводящей жидкости. Движение проводящей жидкости в постоянном внешнем магнитном поле при малых магнитных числах Рейнольдса, например движение морской воды в магнитном поле Земли, сопровождается взаимосвязанной системой электромагнитных полей и токов, которая, в свою очередь, почти не оказывает влияния на само движение жидкости [1]. Экспериментальное изучение электромагнитных полей с использованием как контактных, так и дистанционных технологий измерения дает информацию о динамике и параметрах исходных гидродинамических процессов, которая может представлять несомненный практический интерес.

Статья состоит из двух разделов. В первом разделе изучены электромагнитные эффекты, связанные с

радиально-симметричной системой прогрессивных поверхностных волн в глубоком море, индуцированной подводными осциллирующими источниками, такими как пульсирующий точечный монополярный источник или вертикально колеблющаяся сфера малого радиуса. Такого рода источники нередко ассоциируются с искусственными подводными объектами разной природы.

Во втором разделе решается задача получения аналитических выражений для электромагнитных полей, индуцированных волнами Коши–Пуассона в постоянном магнитном поле. В природе эти диспергирующие нестационарные волны формируются распадом начального локализованного возмущения и могут возникать, например, от камня, брошенного в воду.

В некоторых случаях задача описания возникновения волн цунами в океане сводится к задаче Коши–Пуассона [2]. В этом отношении изучение электромагнитных полей, производимых такими поверхностными волнами в проводящей жидкости при

постоянном внешнем магнитном поле имеет практическое приложение в конструировании систем раннего оповещения о цунами. И, что особенно важно, электромагнитные поля, индуцированные волнами цунами могут быть зарегистрированы до того, как будут зарегистрированы сами волны, они могут играть роль своего рода электромагнитных предвестников цунами [3].

1. Электромагнитные поля, индуцированные прогрессивными кольцевыми волнами

1.1. Исходные уравнения

Цель данного раздела получить аналитические решения для вариаций электромагнитного поля, вызванных поверхностными кольцевыми волнами, возбуждаемыми осциллирующими подводными источниками [4]. Рассматривается случай жидкости бесконечной глубины, имеющей постоянную электропроводность по всему объему, находящуюся в постоянном внешнем магнитном поле. Это поле \vec{F} имеет вертикальную F_z и горизонтальную F_y компоненты.

Декартова система координат выбрана таким образом, что ось z направлена вертикально вверх, а направление оси y совпадает с направлением горизонтальной компоненты внешнего магнитного поля. Поверхность раздела между водой и воздухом совпадает с плоскостью $z = 0$. В последующих обозначениях величины электромагнитных полей в воздухе выделяются нижним индексом a , при этом величины полей и токов в воде индекса не имеют.

Исходные уравнения для определения электромагнитных величин – это уравнения Максвелла в среде, записанные с использованием известных упрощающих предположений [1]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \\ \operatorname{rot} \vec{B} &= \frac{4\pi}{c} \vec{J}, \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0, \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{F}], \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} + \frac{\varepsilon - 1}{c} [\vec{v}, \vec{F}], \end{aligned}$$

где: \vec{B} – магнитная индукция, \vec{E} – напряженность электрического поля, \vec{D} – электрическая индукция, \vec{J} – плотность электрического тока, c – скорость света в вакууме, σ – проводимость жидкости, \vec{v} – поле скоростей жидкости, ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Условия на поверхности раздела сред имеют следующую форму:

$$\begin{aligned} D_{na} - D_n &= 4\pi q, \\ B_{na} &= B_n, \\ \vec{B}_{\tau a} &= \vec{B}_{\tau}, \\ \vec{E}_{\tau a} &= \vec{E}_{\tau}. \end{aligned} \quad (1)$$

Индекс n обозначает нормальную к поверхности раздела компоненту соответствующего вектора, τ обозначает тангенциальную компоненту, q – это плотность поверхностного заряда.

1.2. Уравнение для магнитного вектора Герца

В том случае, когда поле скоростей предполагается потенциальным, удобно записать эти уравнения и условия на поверхности раздела сред через магнитный вектор Герца \vec{P} и потенциал скоростей ϕ :

$$v_m \Delta \vec{P} - \partial_t \vec{P} = \phi \vec{F}, \quad \Delta \vec{P}_a = 0. \quad (2)$$

Здесь как вектор Герца \vec{P} , так и вектор внешнего постоянного магнитного поля $\vec{F} : (0, F_y, F_z)$ имеют две компоненты $\vec{P} : (0, P_y, P_z)$; $v_m = c^2 / 4\pi\sigma$ – магнитная вязкость.

Векторное уравнение (2) может рассматриваться как два отдельных скалярных уравнения для y и z компонент соответствующих векторов. Для воздуха уравнение превращается в обычное уравнение Лапласа. Компоненты векторов электромагнитного поля и плотности тока можно найти дифференцированием:

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{P}, \\ \vec{E} &= -\frac{1}{c} \operatorname{rot} \partial_t \vec{P}, \\ \vec{J} &= -\frac{\sigma}{c} \operatorname{rot} (\partial_t \vec{P} + \phi \vec{F}), \\ \vec{v} &= -\operatorname{grad} \phi. \end{aligned} \quad (3)$$

Подстановка этих выражений в (1) позволяет получить условия на поверхности раздела сред при $z = 0$ для магнитного вектора Герца:

$$\begin{aligned} P_z &= P_{az}, \\ \partial_z P_y &= \partial_z P_{ay}, \\ \Delta P_y &= \Delta P_{ay}, \\ \partial_z P_z + \partial_y P_y &= \partial_z P_{az} + \partial_y P_{ay}. \end{aligned} \quad (4)$$

1.3. Форма потенциала скоростей жидкости

Предположим, что потенциал скоростей жидкости удовлетворяет уравнению Лапласа и выбран в форме анзаца:

$$\phi(x, y, t) = R(x, y) e^{i\omega t + kz}, \quad (5)$$

где комплексная функция двух переменных $R(x, y)$ должна удовлетворять двумерному уравнению Гельмгольца:

$$(\partial_x^2 + \partial_y^2)R + k^2 R = 0.$$

Например, в простейшем случае распространяющихся вправо поверхностных волн в глубоком море $R = R_0 e^{i\omega t - ikx + kz}$ с обычным дисперсионным соотношением $\omega^2 = kg$. Здесь ω – частота поверхностных волн, $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число, связанное с длиной волны λ , g – ускорение свободного падения.

Решения для электромагнитных величин могут быть получены без дальнейшего уточнения формы функции $R(x, y)$. Таким образом, получаем решения для целого класса аналогичных задач, отличающихся по форме этой функции.

Далее рассматривается случай кольцевых прогрессивных волн, распространяющихся от источника. Для этого случая потенциал скоростей в дальней зоне $r \gg \lambda$ имеет форму [1]:

$$\phi(r, t) = A(k) \text{Im} \left[H_0^{(2)}(kr) e^{i\omega t + kz} \right], \quad (6)$$

где r – радиальная координата, $H_0^{(2)}$ – функция Ханкеля второго рода.

Амплитудный коэффициент $A(k)$ зависит от волнового числа k и определяется методом возбуждения волн. В частности, если волны производятся пульсирующим точечным монопольным источником, расположенным на глубине h и имеющим производительность $Q = Q_0 \cos \omega t$, то $A(k) = (Q_0 k / 2) e^{-kh}$. Если же генерация волн осуществляется вертикальными колебаниями сферы радиуса a с амплитудой M , расположенной на глубине h , то $A(k) = M \pi a^3 k^2 \sqrt{kg} e^{-kh}$ [4].

1.4. Решение для вектора Герца в общем виде

Ищется решение уравнений (2) с потенциалом (5) и с условиями на интерфейсе (4) в стандартной форме суперпозиции частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения. Для удобства вначале исключим множитель $e^{i\omega t}$ в выражениях \vec{P}, \vec{P}_a , для чего положим $\vec{P} = \vec{P} e^{i\omega t}$ и $\vec{P}_a = \vec{P}_a e^{i\omega t}$ (в дальнейшем штрихи будут опущены):

$$\begin{aligned} \vec{P} &= -\frac{1}{i\omega} \vec{F} R e^{kz} + \vec{G} e^{iz}, \\ \vec{P}_a &= \vec{G}_a e^{-kz}, \end{aligned} \quad (7)$$

где функции $\vec{G}(x, y)$ и $\vec{G}_a(x, y)$ удовлетворяют тому же уравнению Гельмгольца, что и функция $R(x, y)$. После подстановки этих выражений в интерфейсные условия (4) на поверхности $z = 0$ мы получаем уравнения для $\vec{G}(x, y)$ и $\vec{G}_a(x, y)$, решая которые получаем выражения для компонент вектора Герца:

$$\begin{aligned} P_y &= -\frac{1}{i\omega} F_y R e^{kz}, \\ P_{ay} &= \frac{1}{i\omega} F_y R e^{-kz}, \\ P_z &= \frac{1}{i\omega} \left[\frac{2}{\varkappa + k} e^{\varkappa z} \hat{S} - e^{kz} F_z \right] R, \\ P_{az} &= \frac{1}{i\omega} e^{-kz} \left[\frac{2}{\varkappa + k} \hat{S} - F_z \right] R. \end{aligned}$$

Здесь для краткости введен линейный оператор $\hat{S} = F_y \partial_y + k F_z$. Параметр \varkappa имеет размерность волнового числа: $\varkappa^2 = k^2 - k_0^2$, $k_0^2 = -i\omega / \nu_m$.

Введем характерную частоту $\omega_0 = (g/c) \sqrt[3]{4\pi\sigma c/g}$, где g – ускорение свободного падения. Зависимость величины ω_0 от электропроводности жидкости σ приведена на рис. 1.

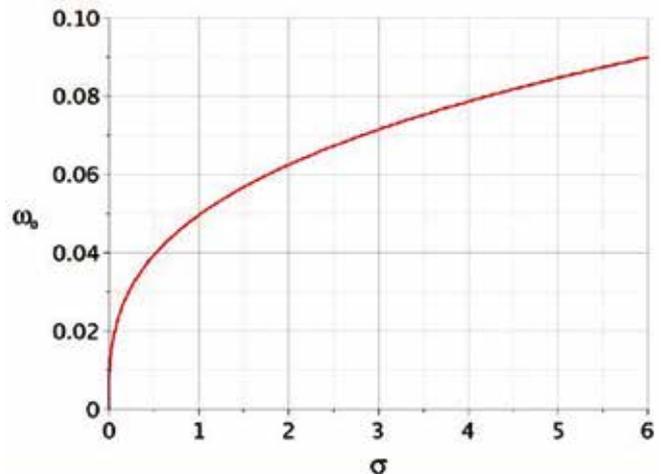


Рис. 1. Зависимость характерной частоты от электропроводности жидкости $\sigma \left(\frac{\text{СМ}}{\text{М}} \right)$

Используя дисперсионное соотношение $\omega^2 = kg$, получим выражения для действительной и мнимой частей $\varkappa = \alpha + i\beta$ (рис. 2):

$$\alpha = \frac{\omega^2 \sqrt{2}}{2g} \sqrt{1 + \sqrt{1 + (\omega_0 / \omega)^6}},$$

$$\beta = \frac{\omega^2 \sqrt{2}}{2g} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + (\omega_0 / \omega)^6}}.$$

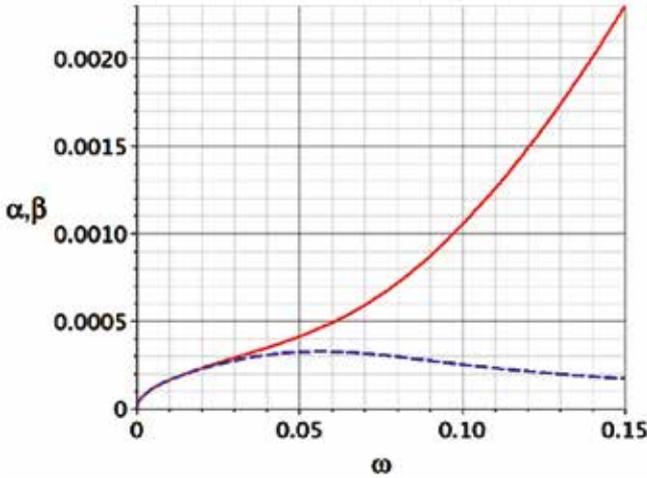


Рис. 2. Зависимость $\alpha(\omega)$ (верхняя кривая) и $\beta(\omega)$ (нижняя кривая) от ω , $\omega_0 = 0.08$

Решения уравнений для вектора Герца, ассоциированные с кольцевыми прогрессивными волнами, распространяющимися по поверхности глубокой жидкости с потенциалом скорости (6), таковы:

$$P_z = Ck^{-1} \left(2\bar{\omega}^3 k^{-2} \hat{S} \times \right. \\ \left. \times [(k - \alpha)\Lambda_3 - \beta\Lambda_4] e^{(\alpha - k)z} + F_z \Lambda_2 \right),$$

$$P_{az} = Ck^{-1} e^{-kz} \left(2\bar{\omega}^3 k^{-2} \hat{S} \times \right. \\ \left. \times [(k - \alpha)\Lambda_1 - \beta\Lambda_2] + F_z \Lambda_2 \right),$$

$$P_y = Ck^{-1} e^{kz} F_y \Lambda_2,$$

$$P_{ay} = -Ck^{-1} e^{-kz} F_y \Lambda_2,$$

$$\Lambda_1(r, t) = \text{Im} \left(H_0^{(2)}(kr) e^{i\omega t} \right),$$

$$\Lambda_3(r, z, t) = \text{Im} \left(H_0^{(2)}(kr) e^{i(\omega t + \beta z)} \right),$$

$$\Lambda_2(r, t) = \text{Im} \left(iH_0^{(2)}(kr) e^{i\omega t} \right),$$

$$\Lambda_4(r, z, t) = \text{Im} \left(iH_0^{(2)}(kr) e^{i(\omega t + \beta z)} \right),$$

где $C(\omega) = (\omega / g) A(\omega^2 / g)$ и $\bar{\omega} = \omega / \omega_0$.

Выражения для компонент электромагнитного поля и плотности тока получаются дифференцированием формул (8) по правилам (3).

Используя асимптотические выражения для функций Ханкеля [5], далее напишем выражения для электромагнитных величин в дальней зоне $r \gg \lambda$.

1.5. Решения для вертикального внешнего магнитного поля

Для случая вертикального внешнего магнитного поля справедливо:

$$B_r = F_z C_1 \left[e^{\alpha z} \left(\xi(\psi_1) + \cos \psi_1 \right) - e^{kz} \cos \theta_1 \right],$$

$$B_z = F_z C_1 \left[e^{\alpha z} \left(\xi(\psi_0) - \cos \psi_0 \right) + e^{kz} \cos \theta_0 \right],$$

$$B_{ar} = F_z C_1 e^{-kz} \xi(\theta_1),$$

$$B_{az} = F_z C_1 e^{-kz} \xi(\theta_0),$$

$$E_y = F_z C_0 \left[e^{\alpha z} \left(\xi(\psi_0) - \cos \psi_0 \right) + e^{kz} \cos \theta_0 \right],$$

$$E_{ay} = F_z C_0 e^{-kz} \xi(\theta_0),$$

$$J_\gamma = \sigma F_z C_0 e^{\alpha z} \left(\xi(\psi_0) - \cos \psi_0 \right).$$

Здесь индексы r и γ обозначают радиальную и тангенциальную компоненты векторов соответственно. Имеем:

$$\theta_m = \omega t - kr + \frac{m\pi}{2} + \frac{\pi}{4},$$

$$\psi_m = \theta_m + \beta z,$$

$$\xi(\theta) = 2\bar{\omega}^3 k^{-2} (\alpha - k) (\beta \cos \theta - k \sin \theta),$$

$$C_1(r) = 2 \frac{C}{\lambda} \sqrt{\frac{\lambda}{r}}, \quad C_0(r) = \frac{\lambda}{\lambda_0} C_1(r),$$

$$\lambda = 2\pi g / \omega^2 \quad \lambda_0 = 2\pi c / \omega.$$

Полученные выражения имеют следующие особенности: все величины убывают экспоненциально с расстоянием от поверхности жидкости и убывают по цилиндрическому закону $1/\sqrt{r}$ с увеличением расстояния от начала координат; они также имеют периодическую зависимость от времени и с точностью $1/\sqrt{r}$ периодически зависят от горизонтальной координаты. Каждая величина имеет цилиндрическую симметрию и имеет форму прогрессивной волны, распространяющейся от источника. Индуцированный вектор магнитного поля лежит в плоскостях, проходящих через вертикальную ось. В каждой точке пространства над поверхностью жидкости вектор вращается со временем, описывая окружность. Под поверхностью эта окружность деформируется. Электрическое поле и плотность тока имеют только компоненты, направленные вдоль гребней волн. Линии электрического тока, будучи замкнутыми, формируют систему концентрических окружностей. Следует также отметить, что из-за эффекта самоиндукции тангенциальная компонента электрического поля отлична от нуля и достигает максимума на частоте $\omega \approx \omega_0$.

1.6. Решения для горизонтального внешнего магнитного поля

Для случая горизонтального внешнего постоянного магнитного поля справедливо для магнитного поля в жидкости:

$$\begin{aligned}
 B_x &= \frac{1}{2} F_y C_1 \left[e^{\alpha z} (\xi(\psi_0) + \cos \psi_0) - e^{kz} \cos \theta_0 \right] \sin 2\gamma, \\
 B_y &= \frac{1}{2} F_y C_1 \left[e^{\alpha z} (\xi(\psi_0) + \cos \psi_0) - e^{kz} \cos \theta_0 \right] (1 - \cos 2\gamma), \\
 B_z &= F_y C_1 \left[e^{\alpha z} (\xi(\psi_1) - \cos \psi_1) + e^{kz} \cos \theta_1 \right] \sin \gamma.
 \end{aligned}$$

Для магнитного поля в воздухе:

$$\begin{aligned}
 B_{ax} &= \frac{1}{2} F_y C_1 e^{-kz} \xi(\theta_0) \sin 2\gamma, \\
 B_{ay} &= \frac{1}{2} F_y C_1 e^{-kz} \xi(\theta_0) (1 - \cos 2\gamma), \\
 B_{az} &= F_y C_1 e^{-kz} \xi(\theta_1) \sin \gamma.
 \end{aligned}$$

Для электрического тока и электрического поля в жидкости имеем:

$$\begin{aligned}
 J_x &= \sigma \frac{1}{2} F_y C_0 e^{\alpha z} (\xi(\psi_1) - \cos \psi_1) (1 - \cos 2\gamma), \\
 J_y &= -\sigma \frac{1}{2} F_y C_0 e^{\alpha z} (\xi(\psi_1) - \cos \psi_1) \sin 2\gamma, \\
 E_x &= \frac{1}{2} F_y C_0 \left[e^{\alpha z} (\xi(\psi_1) - \cos \psi_1) (1 - \cos 2\gamma) + 2e^{kz} \cos \theta_1 \right], \\
 E_y &= -\frac{1}{2} F_y C_0 e^{\alpha z} (\xi(\psi_1) - \cos \psi_1) \sin 2\gamma, \\
 E_z &= F_y C_0 e^{kz} \sin \theta_1 \cos \gamma.
 \end{aligned}$$

Для электрического поля в воздухе и для плотности поверхностного электрического заряда получается:

$$\begin{aligned}
 E_{ax} &= \frac{1}{2} F_y C_0 e^{-kz} \left[(\xi(\theta_1) - \cos \theta_1) (1 - \cos 2\gamma) + 2\cos \theta_1 \right], \\
 E_{ay} &= -\frac{1}{2} F_y C_0 e^{-kz} (\xi(\theta_1) - \cos \theta_1) \sin 2\gamma, \\
 E_{az} &= -F_y C_0 e^{-kz} \sin \theta_1 \cos \gamma, \\
 q &= -\frac{1}{2\pi} F_y C_0 \sin \theta_1 \cos \gamma.
 \end{aligned}$$

Как следует из приведенных выше выражений для случая горизонтального внешнего магнитного поля все три компоненты индуцированного электрического и магнитного полей в воздухе и в жидкости не обращаются в ноль. И их величины существенно зависят от полярного угла .

Линии электрического тока формируют замкнутые конфигурации, симметричные по отношению к началу координат и к осям x и y . Условия непротекания электрического тока через поверхность приводят к возникновению поверхностных зарядов q и, следовательно, к электростатическим полям E_{az}, E_z .

2. Электромагнитные поля, индуцированные нестационарными кольцевыми волнами

2.1. Постановка задачи и метод решения

Необходимо получить аналитические выражения для электромагнитных полей, индуцированных волнами Коши–Пуассона в постоянном магнитном поле. Задача рассматривается в приближении глубокого океана, однородного по электрической проводимости. Декартова система координат выбрана так, что направление оси совпадает с направлением горизонтальной проекции вектора внешнего магнитного поля \vec{F} . Ось z направлена вертикально вверх. Величины, относящиеся к воде, взяты без индекса, а величины в воздухе отмечены подстрочным индексом a .

Задачу удобно решать, если записать уравнения Максвелла через магнитный векторный потенциал Герца (2). Компоненты электромагнитного поля и плотности электрического тока можно найти из вектора Герца, используя выражения (3). Уравнение (2) решается для каждой из сред с использованием условий на поверхности $z = 0$ раздела сред (4).

Поскольку волны задачи Коши–Пуассона нестационарны, представляется удобным для получения решений уравнения (2) использовать метод преобразования Лапласа. Согласно этому методу мы связываем с вектором Герца и с потенциалом скорости

их интегральные изображения: $\mathcal{L}(\vec{P}(t)) = \vec{u}(p)$; $\mathcal{L}(\phi(t)) = s(p)$. Уравнение (2) также подвергается преобразованию Лапласа с нулевыми начальными условиями для $\vec{P}(t)$.

2.2. Решение для вектора Герца

В результате получается система уравнений для $\vec{u}(p)$. Решая ее с интерфейсными условиями (3), мы

найдем эту функцию и, переходя обратно от изображений к оригиналам, получим решение для $\bar{P}(t)$:

$$v_m \Delta \bar{u} - p \bar{u} = s \bar{F}, \quad \Delta \bar{u}_a = 0.$$

Сначала получим решения для элементарного потенциала, имеющего следующий вид:

$$\begin{aligned} \phi(t) &= 0 \text{ for } t < 0 \text{ and} \\ \phi(t) &= R(x, y) e^{kz} \sin \omega t \text{ for } t \geq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Его изображение таково:

$$s(p) = R e^{kz} \left(\omega / (\omega^2 + p^2) \right).$$

Здесь k – волновое число, ω – частота. Решение для изображения вектора Герца выглядит так:

$$\begin{aligned} u_y &= -G(p) F_y e^{kz} R(x, y), \\ u_{ay} &= G(p) F_y e^{-kz} R(x, y), \\ u_z &= M(p) e^{\varkappa(p)z} \left(F_z + F_y \frac{\partial}{k \partial y} \right) R(x, y) + \\ &+ G(p) \left(F_z \left(e^{\varkappa(p)z} - e^{kz} \right) + F_y \frac{\partial}{k \partial y} \right) R(x, y), \\ u_{az} &= M(p) e^{-kz} \left(F_z + F_y \frac{\partial}{k \partial y} \right) R(x, y) + \\ &+ G(p) e^{-kz} F_y \frac{\partial}{k \partial y} R(x, y). \end{aligned}$$

$$G(p) = \frac{1}{p} \frac{\omega}{\omega^2 + p^2},$$

$$\begin{aligned} M(p) &= \frac{1}{\Omega^2} \frac{2\Omega}{\Omega^2 + (p/\bar{\alpha})^2} \left(\frac{\bar{\alpha}}{p} \right)^2 \times \\ &\times \left[\left(\sqrt{1 + (p/\bar{\alpha})} - 1 \right) - \frac{1}{2} (p/\bar{\alpha}) \right], \end{aligned}$$

где $\bar{\alpha} = v_m k^2$ и $\Omega = \omega / \bar{\alpha}$. Здесь введено обозначение

$$\varkappa(p) = \sqrt{k^2 + v_m^{-1} p}.$$

По полученным изображениям можно восстановить исходные функции. Далее мы ограничимся рассмотрением только полей в воздухе и получим оригиналы функций $G(p)$ and $M(p)$:

$$\mathcal{L}^{-1}(G(p)) = f_1(t) = \frac{1}{\omega} (1 - \cos(\omega t)),$$

$$\mathcal{L}^{-1}(M(p)) = f_2(t) = f(\bar{\alpha} t),$$

$$f(t) = \frac{2}{\bar{\alpha} \Omega} \left(\frac{\sin \Omega t}{\Omega} + \frac{\cos \Omega t}{2} + \right.$$

$$\left. + \left[\left(t + \frac{1}{2} \right) \left(\operatorname{erf}(\sqrt{t}) - 1 \right) + \sqrt{\frac{t}{\pi}} e^{-t} \right] - \psi(t) \right),$$

$$\begin{aligned} \nu(t) &= \frac{1}{\Omega} \operatorname{Im} \left(\sqrt{1 + i\Omega} e^{i\Omega t} \operatorname{erf}(\sqrt{1 + i\Omega} \sqrt{t}) \right) = \\ &= \frac{1}{\Omega} \frac{e^{-t}}{\sqrt{\pi t}} \operatorname{Im} \left(F_1(1, 1/2, (1 + i\Omega)t) \right). \end{aligned}$$

Здесь $\operatorname{erf}(x)$ – интеграл вероятности и $F_1(a, c, z)$ – вырожденная гипергеометрическая функция Куммера.

2.3. Некоторые асимптотические оценки

Рассмотрим безразмерный параметр Ω :

$$\Omega = \omega / \bar{\alpha} = (kg)^{1/2} / (v_m k^2) = (\lambda / \lambda_m)^{3/2},$$

где $\lambda_m = (v_m^2 / g)^{1/3}$.

Оказывается, что величина Ω определяется отношением характерного размера возмущения λ к электромагнитной длине λ_m , которая зависит от электропроводности морской воды и определяет в нашем случае естественный пространственный масштаб (см. рис. 3).

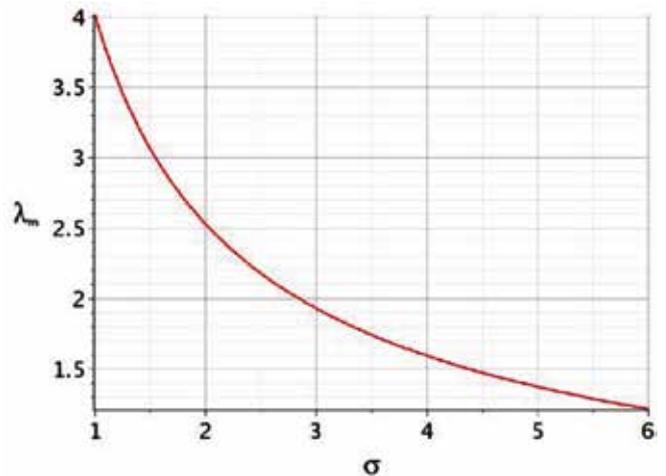


Рис. 3. Зависимость λ_m (км) от проводимости морской воды σ (См/м)

Качественное поведение решений зависит от относительного размера волновых возмущений в терминах этого пространственного масштаба. С уменьшением этого размера величина Ω также уменьшается. Если $\Omega \ll 1$, то для всех моментов времени с точностью до членов второго порядка по Ω получается:

$$\bar{\alpha} f(t) = -\frac{1}{4} \sin(\Omega t) + \Omega \left(f_0(t) + \frac{1}{8} \cos(\Omega t) \right),$$

$$f_0(t) = \left(\frac{1}{8} - \frac{t}{4} - \frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3} \right) (\operatorname{erf}(\sqrt{t}) - 1) + \left(\frac{t^2}{3} + \frac{t}{3} - \frac{1}{4} \right) \sqrt{\frac{t}{\pi}} \exp(-t).$$

Окончательно выпишем решение для вектора Герца, возбужденного элементарным потенциалом (9) в воздухе:

$$\begin{aligned} P_{ay} &= f_1(t) F_y e^{-kz} R(x, y), \\ P_{az} &= f_2(t) e^{-kz} \left(F_z + F_y \frac{\partial}{k \partial y} \right) R(x, y) + \\ &+ f_1(t) e^{-kz} F_y \frac{\partial}{k \partial y} R(x, y). \end{aligned} \quad (10)$$

2.4. Потенциал скоростей волн Коши–Пуассона

Электромагнитные поля, возбуждаемые дисперсионным распадом локализованного возмущения морской поверхности, можно найти исходя из общего вида потенциала скоростей жидкости для этого случая [4]:

$$\begin{aligned} \phi &= \int_0^\infty \sqrt{kg} e^{kz} \sin \sqrt{kg} t J_0(kr) \times \\ &\times \left[\int_0^\infty r' J_0(kr') N(r') dr' \right] dk. \end{aligned}$$

Здесь $J(kr)$ – функция Бесселя, $N(r)$ – исходная радиально-симметричная форма поверхности.

2.5. Вектор Герца, возбужденный волнами Коши–Пуассона

Чтобы найти компоненты вектора Герца, соответствующего такому потенциалу скоростей, необходимо в выражениях (10) для $R(x, y)$ подставить $R(x, y) = \omega J_0(kr) \int_0^\infty r' J_0(kr') N(r') dr'$ и проинтегрировать их по k в полубесконечных пределах:

$$\begin{aligned} P_{ay} &= F_y \int_0^\infty f_1(t) \sqrt{kg} e^{-kz} J_0(kr) \times \\ &\times \left[\int_0^\infty r' J_0(kr') N(r') dr' \right] dk, \\ P_{az} &= -F_y \sin \gamma \int_0^\infty f_1(t) \sqrt{kg} e^{-kz} J_1(kr) \times \\ &\times \left[\int_0^\infty r' J_0(kr') N(r') dr' \right] dk + \\ &+ \int_0^\infty f_2(t) \sqrt{kg} e^{-kz} \times \\ &\times \left[F_z J_0(kr) - F_y J_1(kr) \sin \gamma \right] \times \end{aligned} \quad (11)$$

$$\times \left[\int_0^\infty r' J_0(kr') N(r') dr' \right] dk.$$

Таковы окончательные общие решения задачи определения электромагнитных полей в воздухе, индуцированных распадом радиально-симметричных начальных возмущений поверхности проводящей жидкости в постоянном внешнем магнитном поле при малых магнитных числах Рейнольдса Re_m . Компоненты электромагнитных велчин можно найти по формулам (3). Если необходимо найти электромагнитные поля, индуцированные начальным локализованным импульсом давления в воде, то решения (11), продифференцированные по времени, дадут нам искомый результат для профиля начального импульса давления $P(r) = (\rho / g) N(r)$, где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

2.6. Поведение решений на оси $r = 0$

Рассмотрим различные асимптотики полученных решений. Предположим для определенности, что начальная форма поверхности жидкости задана формулой (см. рис. 4):

$$N(r) = A[1 + (r/a)^2]^{-3/2}. \quad (12)$$

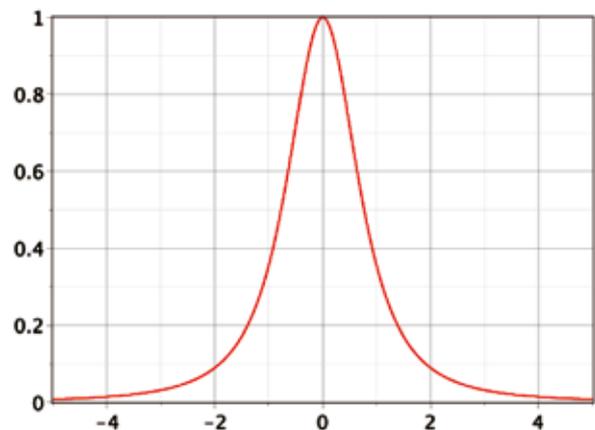


Рис. 4. Начальная форма поверхности моря $N(r)$ для $A = 1$ и $a = 1$

Удобно ввести безразмерные переменные $r' = r/a$, $z' = z/a$ и $t' = (g/4a)^2 t$. Далее штрихи будут опущены. Также введем безразмерные параметры $Re_m = A\sqrt{ga}/v_m$ и $L_m = 2(A/a)(\sqrt{ga}/c)$. Предположим, что размер возмущения достаточно мал, так что для почти всех величин волнового числа справедливо $\Omega \ll 1$. Фактически для этого необходимо, чтобы $a \ll l \approx 1.5$ км. Положим $r = 0$ и напомним

решения для ненулевых компонент электромагнитного поля на этой оси (см. рис. 5):

$$B_{az} = -\frac{1}{2} F_z Re_m \frac{t}{(1+z)^2} F_1\left(2, 3/2, -\frac{t^2}{1+z}\right),$$

$$B_{ay} = -\frac{1}{2} F_y Re_m \frac{t}{(1+z)^2} F_1\left(2, 3/2, -\frac{t^2}{1+z}\right),$$

$$E_{ax} = -F_y L_m \frac{t}{(1+z)^3} F_1\left(3, 3/2, -\frac{t^2}{1+z}\right),$$

$$\zeta(0, t) = A F_1(2, 1/2, -t^2).$$

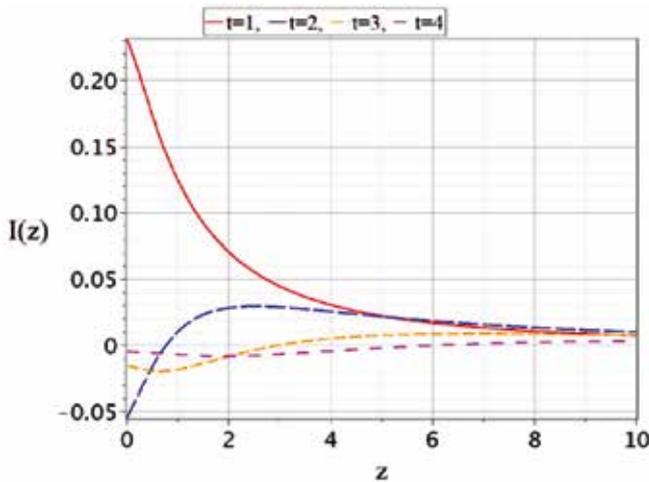


Рис. 5. Функция $I = \frac{t}{(1+z)^2} F_1(2, 3/2, -t^2/(1+z))$ от z при $t = 1, 2, 3, 4$

2.7. Поведение решений при больших r и t

Рассмотрим, как компоненты поля ведут себя в пространстве, если время, прошедшее с распада начального возмущения, достаточно велико. И поскольку, как уже объяснялось, электрические и магнитные поля аналогичны в своем поведении, ограничимся только магнитными полями. Изучим формулы (11) с начальным возмущением (12) методом стационарной фазы [6] и получим следующие результаты:

$$B_{ax} = -\frac{1}{8} Re_m (2F_z I_1 \cos \gamma + F_y I_0 \sin 2\gamma),$$

$$B_{ay} = -\frac{1}{8} Re_m (2F_z I_1 \sin \gamma + F_y I_0 (1 - \cos 2\gamma)),$$

$$B_{az} = -\frac{1}{4} Re_m (F_z I_0 + F_y I_1 \sin \gamma).$$

Здесь функции I_0 и I_1 таковы:

$$I_0 = \frac{t\sqrt{2}}{r^2} \exp\left[-\frac{t^2}{r^2}(1+z)\right] \sin\left(\frac{t^2}{r}\right),$$

$$I_1 = \frac{t\sqrt{2}}{r^2} \exp\left[-\frac{t^2}{r^2}(1+z)\right] \cos\left(\frac{t^2}{r}\right).$$

Как и ожидалось, компоненты магнитного поля формируют в пространстве пакет осцилляций, который распространяется от начала со скоростью $v = [ga(1+z)/4]^{1/2}$ на каждой высоте (см. рис. 6). Скорость пакета возрастает с увеличением высоты. Этот эффект может быть объяснен тем фактом, что в бесконечно глубоком море с увеличением длины гармонической волны ее фазовая скорость бесконечно возрастает. Тем не менее, поскольку имеет место экспоненциальное ослабление индуцированных полей отдельных гармоник с высотой, и ослабление тем сильнее, чем короче длина волны гармоники, получается, что на более высоких частотах коротковолновые компоненты отфильтровываются, а остающиеся более быстрые длинноволновые компоненты дают основной вклад в вариации электромагнитного поля.

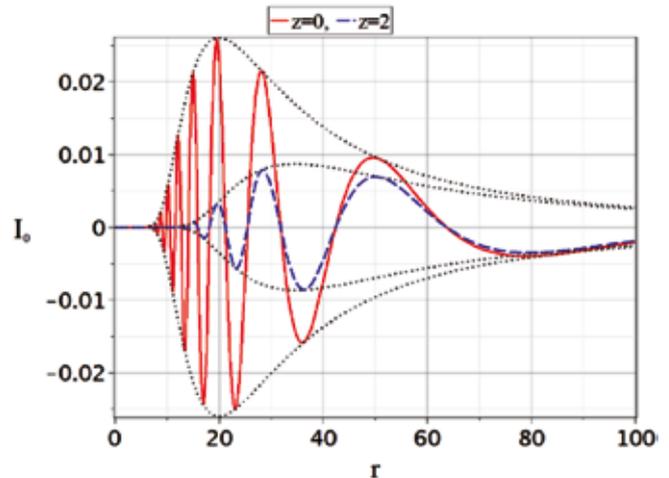


Рис. 6. Функции $I_0(20,0, r)$ и $I_0(20,2, r)$ от r для $t = 20$ и $z = 0,2$

3. Выводы

В статье изучены электромагнитные эффекты, связанные с радиально-симметричной системой прогрессивных поверхностных волн в глубоком море, индуцированной подводными осциллирующими источниками или дисперсионным распадом начальных локализованных возмущений морской поверхности.

1. Исходные уравнения Максвелла сформулированы через магнитный вектор Герца, и для целого семейства потенциальных полей скорости жидкости получены общие решения для электромагнитных полей и плотности тока.

2. В частности, рассмотрены электромагнитные поля, индуцированные подводными осциллирующими

ми источниками, такими как пульсирующий точечный монополярный источник и вертикально колеблющаяся сфера малого радиуса.

3. Получены аналитические выражения для электромагнитных полей в воздухе, индуцированных волнами Коши–Пуассона, возникающих при распаде начального локализованного возмущения поверхности жидкости. Считается, что решения для волн такого типа могут хорошо описывать распространение волн цунами в океане.

4. Рассмотрен конкретный пример, когда для локального возмущения поверхности жидкости специального типа найдены решения для электромагнитных полей в воздухе при малых магнитных числах

Рейнольдса. Для этих решений рассмотрены их различные асимптотики.

5. Исследовано поведение полученных решений в случае больших времен и расстояний от начала координат. Оказалось, что скорость распространения пакета колебаний электромагнитного поля, индуцированных диспергирующими кольцевыми волнами, увеличивается с ростом высоты. Это дает возможность рассматривать в данном случае вариации электромагнитного поля в воздухе на достаточно большой высоте над океаном как предвестники волн цунами.

Результаты могут быть полезны при детектировании волн цунами дистанционными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sanford T.B. (1971) Motionally Induced Electric and Magnetic Fields in the Sea. // Journal of Geophysical research. 1971. Vol. 76, No. 15. P. 3476–3492.
2. Мурти Т.С. Сейсмические морские волны цунами. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 446 с.
3. Белоконов В.И., Родкин А.Ф., Смаль Н.А. Возмущения магнитного поля Земли – возможные предвестники волн цунами // Электромагнитные и акустические процессы в океане. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1987. 188 с.
4. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977. 816 с.
5. Лаврентьев М.А., Шаббат Б.В. Методы теории функций комплексного переменного. М.: Наука, 1987. 688 с.
6. Федорюк М.В. Асимптотика. Интегралы и ряды. М.: Наука, 1987. 584 с.

Об авторах

КОЗИЦКИЙ Сергей Борисович, к.ф.-м.н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Научные интересы: акустика океана, гидродинамика, океанология, магнитная гидродинамика, математическое моделирование, метод амплитудных уравнений

Тел.: +7(924)5276801

E-mail: skozzi@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0002-0231-8851

КОЗИЦКАЯ Ирина Сергеевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Научные интересы: математическая биология, акустика океана, математическое моделирование

Тел.: +7(994)0115284

E-mail: irkozic@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-9212-6238

Для цитирования:

Козицкий С.Б., Козицкая И.С. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ВОЛНАМИ В ГЛУБОКОМ МОРЕ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2(36). С. 66–75. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_07.

ELECTROMAGNETIC FIELDS INDUCED BY SURFACE RING WAVES IN THE DEEP SEA

S.B. Kozitskiy, I.S. Kozitskaya

The paper studies electromagnetic fields induced by the motion of a conducting fluid of infinite depth in an external magnetic field. The Maxwell equations are formulated in terms of the Hertz magnetic vector, and general solutions are obtained for electromagnetic fields and current density for a certain family of potential velocity fields of fluid. In particular, we studied the electromagnetic effects associated with a radially symmetric system of progressive surface waves in the deep sea, generated either by underwater oscillating sources (monopole point source, vertically oscillating sphere), or by the dispersive decay of initially localized disturbances of the sea surface (Cauchy-Poisson waves). For an initial perturbation of a liquid surface of a special type we obtain analytical expressions for electromagnetic fields in the air, induced by Cauchy-Poisson waves. For these solutions we consider various asymptotics and investigate the behavior of the obtained solutions in the case of large times and distances from the origin. It turned out, that variations of the electromagnetic field in the air at a sufficiently high altitude over the ocean can be probable precursors of tsunami waves. The results can be useful in the development of systems for detecting tsunami waves by remote sensing methods.

Keywords: Surface waves; tsunami waves; electromagnetic field variations; magnetic hydrodynamics.

References

1. Sanford, T.B. Motionally Induced Electric and Magnetic Fields in the Sea. *Journal of Geophysical research*. 1971. Vol. 76. No. 15. P. 3476–3492.
2. Murty, T.S. Seismic sea waves tsunami. Marine Environmental Data Services Branch Fisheries and Marine Service Department of Fisheries and the Environment Ottawa, Canada, 1977. 446 p.
3. Belokon', V.I.; Rodkin, A.F.; Smal', N.A. Perturbations of the Earth's magnetic field are possible precursors of tsunami waves. In Book: "Electromagnetic and acoustic processes in the ocean". DVFU: Vladivostok, 1987. 188 p. (in Russian).
4. Sretenskiy, L.N. The Theory of Wave Motions of a Fluid. Moscow: Nauka, 1977. 816 p. (in Russian).
5. Lavrent'ev, M.A.; Shabat, B.V. Methods of the Complex Variable Functions Theory. Moscow: Nauka, 1987. 688 p. (in Russian).
6. Fedoryuk, M.V. Asymptotic: Integrals and Series. Moscow: Nauka, 1987. 544 p. (in Russian).

About the authors

KOZITSKIY Sergey Borisovich, PhD

Il'ichev Pacific oceanological institute

Address: 43 Baltiyskay str., Vladivostok, 690041, Russia

Scientific area: ocean acoustics, fluid dynamics, oceanography, magneto-fluid dynamics, math modelling, amplitude equations method

Phone: +7(924)527-68-01,

E-mail: skozi@poi.dvo.ru

ORCID ID: 0000-0002-0231-8851

KOZITSKAYA Irina Sergeevna

Il'ichev Pacific oceanological institute

Address: 43 Baltiyskay str., Vladivostok, 690041, Russia

Scientific area: mathematical biology, ocean acoustics, math modelling

Phone: +7(994)011-52-84

E-mail: irkozic@gmail.com

ORCID ID: 0000-0002-9212-6238

Recommended citation:

Kozitskiy S.B., Kozitskaya I.S. ELECTROMAGNETIC FIELDS INDUCED BY SURFACE RING WAVES IN THE DEEP SEA. *Underwater investigation and robotics*. 2021. No. 2(36). P. 66–75. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_07.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МОД НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ РЕЛЬЕФА ДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИНВАРИАНТНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

М.С. Казак, П.С. Петров, К.В. Кошель

При моделировании распространения звука в мелком море с проницаемым дном, как правило, пренебрегают эффектом обратного рассеяния акустических волн. В частности, метод параболического уравнения имеет в своей основе именно приближение однонаправленного распространения. Тем не менее в литературе практически отсутствуют оценки амплитуды обратного рассеяния. В данной работе такие оценки получены с использованием модового представления поля в адиабатическом приближении. Данное приближение позволяет отделить обратное рассеяние от взаимодействия мод – другого важного эффекта, наблюдаемого при рассеянии акустических волн на неоднородностях батиметрии. Для случая падения нормальной волны на локализованную неоднородность дна исследована зависимость амплитуды волны, рассеянной в обратном направлении, от размеров неоднородности и номера моды. Для расчета коэффициента отражения используется численное решение уравнения Риккати, которое получается при переходе от краевой задачи для уравнения Гельмгольца для модовой амплитуды к соответствующим уравнениям погружения. Обсуждаются возможности дальнейшего использования модовых уравнений погружения при решении задач распространения звука в океане.

Ключевые слова: акустика океана; метод нормальных волн; метод инвариантного погружения; обратное рассеяние.

Введение

В работе рассматривается задача о падении нормальной волны (акустической моды) на неоднородность рельефа дна в волноводе мелкого моря. Чтобы проиллюстрировать подход, в рамках которого подобную задачу можно решить в общем случае, здесь будет рассмотрен простейший случай адиабатического рассеяния, при котором можно пренебречь возбуждением других мод [1]. Условия применимости адиабатического приближения в задачах такого рода неоднократно обсуждались в литературе [1].

Для решения задачи будет использовано модовое представление акустического поля в двумерном случае, которое в адиабатическом приближении приводит к одномерным уравнениям Гельмгольца для модовых амплитуд [1], описывающим падение плоской волны на неоднородный слой. Такие уравнения могут быть сведены к уравнениям погружения

путем введения функции, описывающей зависимость коэффициента отражения от слоя от положения его правой границы [2,3]. Методика решения волновых задач с помощью уравнений погружения была развита в работах В.И. Кляцкина и его соавторов, причем основополагающая для данного подхода статья была опубликована ровно 40 лет назад [3].

Данным сообщением авторы намерены обозначить новое направление исследований, в котором метод погружения будет использоваться для системы связанных уравнений для модовых амплитуд как в двумерных, так и в трехмерных задачах акустики океана.

1. Постановка задачи и модовое представление поля

Рассматривается задача распространения звука в двумерном волноводе мелкого моря $\Omega = \{(x, z) | z \geq 0\}$,

представленном на рис. 1. Волновод состоит из водного слоя $0 \leq z \leq h(x)$, отделенного от жидкого проницаемого дна поверхностью $z = h(x)$. Предполагается, что вне интервала $x \in [L_0, L]$ море имеет постоянную глубину $h = h_0$. Таким образом, неоднородность рельефа дна в рассматриваемом волноводе локализована на этом интервале.

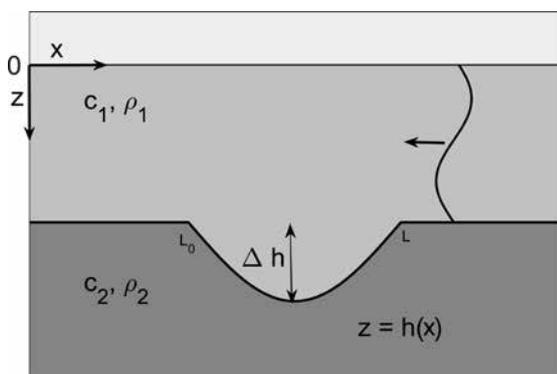


Рис. 1. Схематическое изображение волновода мелкого моря с нормальной волной, падающей на область неоднородности рельефа дна

Распространение звука в таком волноводе описывается двумерным уравнением Гельмгольца [1]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2} P = 0, \quad (1)$$

где $P(x, z)$ – акустическое давление, c – скорость звука, ω – циклическая частота.

Предполагается, что справа на неоднородность рельефа дна падает нормальная волна (мода) $\exp(-ik_{0,j}x)\varphi_{0,j}(z)$, где $\varphi_{0,j}$ есть собственная функция акустической спектральной задачи [1], а $k_{0,j}$ – соответствующее горизонтальное волновое число [1].

Предполагается, что вариации глубины являются настолько малыми, что распространение звука можно считать адиабатическим [1, 4], т.е. решение во всем волноводе может быть представлено в виде $P(x, z) = A_j(x)\varphi_j(x, z)$ (ввиду вариаций глубины моря волновые числа $k_j(x)$ и собственные функции $\varphi_j(x, z)$ акустических мод параметрически зависят от x). Стоит отметить, что условия применимости такого приближения детально рассмотрены в классической работе [4]. В дальнейшем всегда будет иметься в виду одномодовое распространение и опускаться индекс j в предположении, что номер моды зафиксирован.

После подстановки анзаца $P(x, z) = A(x)\phi(z)$ в уравнение (1) получается следующее уравнение для модовой амплитуды:

$$\frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2} + k^2(1 + \varepsilon(x))A(x) = 0, \quad (2)$$

где $\varepsilon(x) = \frac{k^2(x)}{k_0^2} - 1$.

Акустическое поле справа от неоднородности батиметрии (т.е. при $x > L$) представляет собой суперпозицию падающей нормальной волны и волны, отраженной неоднородностью:

$$P^+(x, z) = \left(e^{-ik(x-L)} + R_L e^{ik(x-L)} \right) \phi(z),$$

где R_L есть коэффициент отражения моды, который удобно считать функцией L . Поле $P^-(x, z)$ при $x < L_0$ определяется коэффициентом прохождения моды через неоднородность T_L : $P^-(x, z) = T_L e^{-ik(x-L)} \phi(z)$.

Выражения для $P^\pm(x, z)$ дают следующие краевые условия для уравнения (2) при $x = L_0, x = L$:

$$A(L) = 1 + R, \quad \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow L} = -ik[1 - R], \quad (3)$$

$$A(L_0) = T, \quad \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow L_0} = -ikT.$$

Если исключить R и T из (3), то можно переписать их в виде граничных условий третьего рода:

$$A(L) + \frac{i}{k} \frac{\partial A}{\partial x}(L) = 2, \quad A(L_0) - \frac{i}{k} \frac{\partial A}{\partial x}(L_0) = 0. \quad (4)$$

В данной работе объектом научного интереса является оценка коэффициента отражения нормальной волны R_L от неоднородности рельефа дна при различных значениях параметров задачи. Известно, что в волноводах с проницаемым дном обратным рассеянием звуковых волн на практике почти всегда можно пренебречь [1]. Тем не менее конкретные оценки амплитуды отраженной волны в литературе практически отсутствуют. Поиск решения данной задачи будет проходить с помощью системы модовых уравнений погружения, выводу которых посвящен следующий раздел.

2. Вывод модовых уравнений погружения

Вывод уравнений погружения в данной заметке основан на проведенном выводе из работы [3], однако здесь приводятся соответствующие вычисления в интересах замкнутости изложения. Уравнение (2) и граничные условия (4) дифференцируются по L :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \frac{\partial}{\partial L} A(x, L) + k^2(1 + \varepsilon(x)) \frac{\partial}{\partial L} A(x, L) = 0. \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial L} A(L, L) + \frac{i}{k} \frac{\partial^2 A}{\partial x \partial L}(L, L) = -\frac{\partial A}{\partial x}(L, L) - \frac{i}{k} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2}(L, L),$$

$$\frac{\partial}{\partial L} A(L_0, L) - \frac{i}{k} \frac{\partial^2 A}{\partial x \partial L}(L_0, L) = 0. \quad (6)$$

Здесь под $\frac{\partial^2 A}{\partial x \partial L}(L, L)$ понимается производная функции $A(x, L)$ по x , в которой сделана подстановка $x = L$, после чего результат продифференцирован по L . Нетрудно заметить, что краевые задачи (2), (4) и (5), (6) отличаются только константами, стоящими в правой части первого граничного условия. По этой причине между решениями этих задач существует линейная связь:

$$\frac{\partial}{\partial L} A = \frac{1}{2} \left[-\frac{\partial}{\partial x} A(L, L) - \frac{i}{k} \frac{\partial^2}{\partial x^2} A(L, L) \right] A. \quad (7)$$

Необходимо выразить $\frac{\partial}{\partial x} A(L, L)$ и $\frac{\partial^2}{\partial x^2} A(L, L)$ из первого граничного условия (4) и уравнения (2) соответственно и подставить в (7). Получается соотношение:

$$\frac{\partial}{\partial L} A(x, L) = ik A(x, L) + \frac{1}{2} ik \varepsilon(L) A(L, L) A(x, L), \quad (8)$$

где $A(L, L) = 1 + R(L)$ – поле на границе. Если добавить к равенству (8) начальное условие

$$A(x, L)|_{L \rightarrow x} = A(x, x) = 1 + R(x), \quad (9)$$

то получится задача Коши на функцию $A(x, L)$. Полная производная функции $A(L, L)$ может быть представлена в виде

$$\frac{d}{dL} A(L, L) = \frac{\partial}{\partial x} A(x, L)|_{x \rightarrow L} + \frac{\partial}{\partial L} A(x, L)|_{x \rightarrow L}. \quad (10)$$

Первое слагаемое правой части равенства (10) можно выразить через уравнение (8) при $x \rightarrow L$, а второе – из первого граничного условия (4). Такая процедура приводит к новому уравнению на $A(L, L)$, которое имеет вид:

$$\frac{d}{dL} A(L, L) = 2ik (A(L, L) - 1) + \frac{1}{2} k \varepsilon(L) A^2(L, L). \quad (11)$$

В качестве начального условия для уравнения (11) полагается

$$A(L, L)|_{L \rightarrow L_0} = 1. \quad (12)$$

Теперь можно изменить зависимую переменную на коэффициент отражения $R(L)$, чтобы получить систему уравнений погружения:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial L} A(x, L) = ik A(x, L) + \frac{1}{2} ik \varepsilon(L)(1 + R(L))A(x, L), \\ A(x, L)|_{L \rightarrow x} = 1 + R(x); \\ \frac{d}{dL} R(L) = 2ik R(L) + \frac{1}{2} ik \varepsilon(L)(1 + R(L))^2, \\ R(L_0) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

3. Пример расчета коэффициентов отражения

В качестве примера рассматривается волновод в мелком море. За пределами участка волновода с неоднородным рельефом дна глубина $h(x) = h_0 = 90$ м, в то время как на этом участке она задается формулой $h(x) = h_0 + \Delta h \cdot \sin\left(\pi \frac{x - L_0}{L - L_0}\right)$, где $L_0 = 4800$ м и $L = 5200$ м – левая и правая границы неоднородности соответственно. В водном слое плотность $\rho_w = 1$ г/см³, а скорость звука $c_w = 1500$ м/с; для дна заданы плотность $\rho_b = 2$ г/см³ и скорость звука $c_b = 2000$ м/с. Далее полагается, что частота звука составляет 50 Гц. Для этого значения и указанных выше параметров волновода в нем возбуждается 4 водные моды для всех значений x .

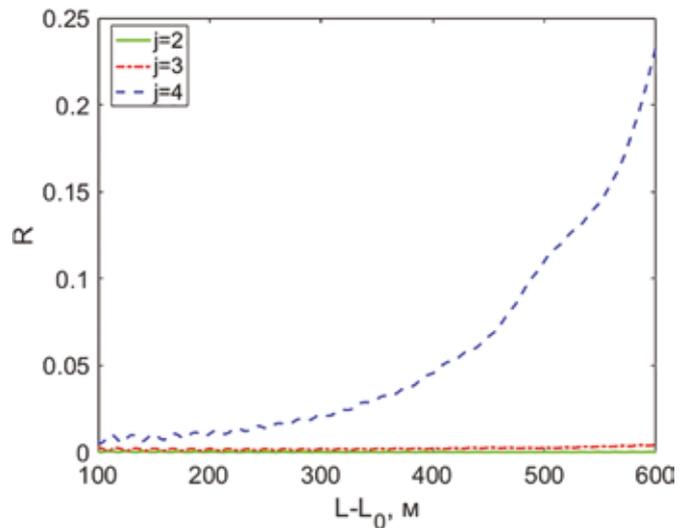
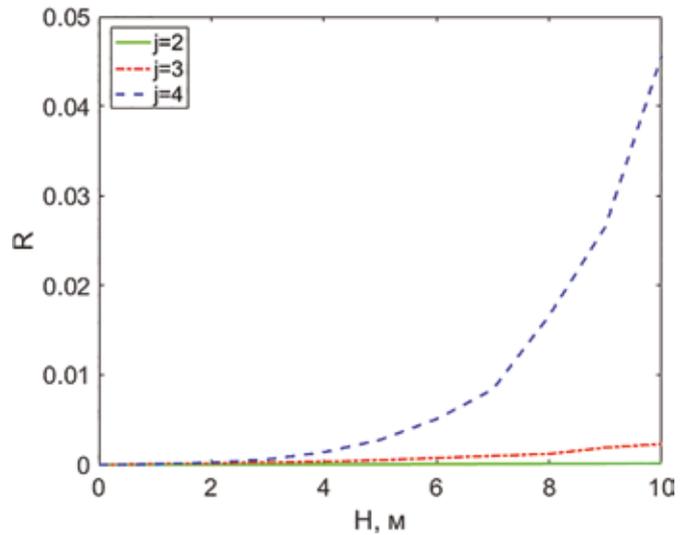


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения R от глубины Δh подводной ямы (вверху) и от ширины неоднородности дна (внизу)

Сначала проводится варьирование перепада глубины Δh на неоднородном участке от 0 до 10 м с шагом 1 м, и для каждого значения находится решение уравнения Риккати из системы (13). На основе этих решений строится график коэффициента отражения R , показанный на рис. 2 (внизу). На графике видно, что данный коэффициент возрастает при увеличении глубины подводной ямы.

Теперь можно рассмотреть волновод с аналогичными параметрами, но при фиксированном значении перепада глубины, связанного с плавной неоднородностью рельефа дна $\Delta h = 10$. Положение левой границы в расчетах будет изменяться в пределах от 4600 м до 5100 м с шагом 1 м с тем, чтобы варьировать ширину неоднородного участка. На основе полученных результатов численного решения уравнения Риккати из системы (13) строится график (рис. 2, внизу) зависимости модуля коэффициента отражения от ширины неоднородного участка рельефа. Графики модуля R для 2-й и 3-й мод с увеличением ширины неоднородности рельефа дна обнаруживают угасающие по величине и амплитуде колебания. На графике абсолютного значения R для 4-й моды (высшей водной моды) также наблюдаются малые колебания угасающей амплитуды, при этом в среднем коэффициент значительно возрастает с увеличением ширины неоднородности.

Заключение

В работе исследована зависимость коэффициента отражения нормальной волны, падающей на неоднородность батиметрии в мелком море. Во многих задачах акустики океана обратным рассеянием при волноводном распространении звука принято пренебрегать, однако, насколько известно авторам, ампли-

туда рассеянной волны для локализованных неоднородностей ранее никем не оценивалась. В рамках исследования соответствующие оценки выполнены в адиабатическом приближении, т.е. для ситуации, когда перекачкой звуковой энергии из одной моды в другую можно пренебречь. Таким образом, эффект обратного рассеяния был изолирован, чтобы оценить именно его вклад в формирование поля.

Приведенные выше оценки показали, что для водных мод амплитуда нормальной волны, рассеянной неоднородностью батиметрии в обратном направлении, может составлять лишь доли процента от амплитуды падающей, однако это не так для водной моды наивысшего номера; для неё амплитуда нормальной волны может достигать нескольких процентов, если неоднородность имеет большие размеры. Таким образом, на практике при расчетах звуковых полей эффектом обратного рассеяния действительно можно пренебрегать, если на акустической трассе имеется небольшое число неоднородностей батиметрии, которые не нарушают адиабатического характера распространения звука.

Для расчетов коэффициентов отражения было использовано модовое представление акустического поля, а соответствующая краевая задача для уравнения модовой амплитуды была сведена к уравнениям погружения. После этого коэффициент отражения был вычислен путем численного решения уравнения Риккати. Описанная методика может быть обобщена таким образом, чтобы учесть взаимодействие мод. В этом случае неизвестная функция в уравнении Риккати будет решаться для матричной функции. Этот подход будет развит в дальнейших работах авторов.

Работа выполнена в рамках темы госзадания ТОИ ДВО РАН "Моделирование разномасштабных динамических процессов в океане" (№ 0271-2019-0001).

ЛИТЕРАТУРА

1. Jensen F., Kuperman W., Porter M., Schmidt H. Computational ocean acoustics. New-York: Springer, 2011. 772 p.
2. Кляцкин В.И., Динамика стохастических систем. М.: Физматлит, 2003. 240 с.
3. Babkin G.I., Klyatskin V.I., Invariant imbedding method for wave problems // Wave motion. 1982. Vol. 4, No. 3. С. 195–207.
4. Pierce A.D. Extension of the method of normal modes to sound propagation in an almost-stratified medium // The Journal of the Acoustical Society of America. 1965. Vol. 37, No. 1. С. 19–27.

Об авторах

КАЗАК Михаил Сергеевич, инженер-исследователь
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: акустика океана, уравнения в частных производных, математическое моделирование

E-mail: kazak.ms@poi.dvo.ru

Телефон: +7(902)078-89-11

ORCID ID: 0000-0002-8141-8665

ПЕТРОВ Павел Сергеевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: акустика океана, уравнения в частных производных, математическое моделирование, метод параболического уравнения

E-mail: petrov@poi.dvo.ru

Телефон: +7(914)960-21-92

ORCID ID: 0000-0002-0087-6681

КОШЕЛЬ Константин Валентинович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

Адрес: г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: геофизическая гидродинамика, вихревая динамика, радиофизика, теория волн, теория случайных процессов и полей, теория динамических систем

E-mail: kvkoshel@poi.dvo.ru

Телефон: +7(924)131-25-02

ORCID ID: 0000-0002-8014-7699

Для цитирования:

Казак М.С., Петров П.С., Кошель К.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МОД НА НЕОДНОРОДНОСТЯХ РЕЛЬЕФА ДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИНВАРИАНТНОГО ПОГРУЖЕНИЯ // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 2(36). С. 76–81. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_08.



THE STUDY OF ACOUSTIC MODES BACK-SCATTERING BY BOTTOM RELIEF INHOMOGENEITIES USING THE INVARIANT IMBEDDING METHOD

M.S. Kazak, P.S. Petrov, K.V. Koshel

In models of sound propagation in a shallow sea with penetrable bottom, the effect of back-scattering of acoustic waves can usually be neglected. The parabolic equation method, for instance, is based on the one-way propagation approximation. Estimations of the magnitude of a back-scattered wave, nevertheless, are almost absent in the literature. In this study, such estimates are obtained in the framework of the adiabatic normal modes theory. This approximation allows us to separate the backward scattering from mode coupling, which is another important effect observed in acoustic wave propagation over bottom relief inhomogeneities. The scattering of a single normal mode on a localized bottom relief inhomogeneity is considered, and the dependence of the amplitude of the backward-scattered wave on the size of the inhomogeneity and mode number is investigated. The numerical solution of the Riccati equation is used for obtaining the reflection coefficient. The latter equation is obtained by transforming the original boundary-value problem for the Helmholtz equation for the mode amplitude to imbedding equations. The possibilities of further generalizations and applications of modal imbedding equations in the issues of underwater sound are discussed.

Keywords: ocean acoustics; normal modes method; invariant imbedding method; back-scattering.

References

1. Jensen, F.; Kuperman, W.; Porter, M.; Schmidt H. Computational ocean acoustics. New-York: Springer, 2011. 772 p.
2. Klyackin, V.I., *Dinamika stohasticheskikh sistem*. M.: Fizmatlit, 2003. 240 p.
3. Babkin, G.I.; Klyatskin, V.I. Invariant imbedding method for wave problems. *Wave motion*. 1982. Vol. 4. No. 3. P. 195–207.
4. Pierce, A.D. Extension of the method of normal modes to sound propagation in an almost-stratified medium. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1965. Vol. 37. No. 1. P. 19–27.

Recommended citation:

Kazak M.S., Petrov P.S., Koshel K.V. THE STUDY OF ACOUSTIC MODES BACK-SCATTERING BY BOTTOM RELIEF INHOMOGENEITIES USING THE INVARIANT IMBEDDING METHOD. *Underwater investigation and robotics*. 2021. No. 2(36). P. 76–81. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_36_02_08.

About the authors

KAZAK Mikhail Sergeevich, research engineer
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: Ocean acoustics, partial differential equations, math modelling, parabolic equation method
E-mail: kazak.ms@poi.dvo.ru
Phone: +7(902)078-89-11
ORCID ID: 0000-0002-8141-8665

PETROV Pavel Sergeevich, PhD, head of the laboratory
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: Ocean acoustics, partial differential equations, math modelling, parabolic equation method
E-mail: petrov@poi.dvo.ru
Phone: +7(914)960-21-92
ORCID ID: 0000-0002-0087-6681

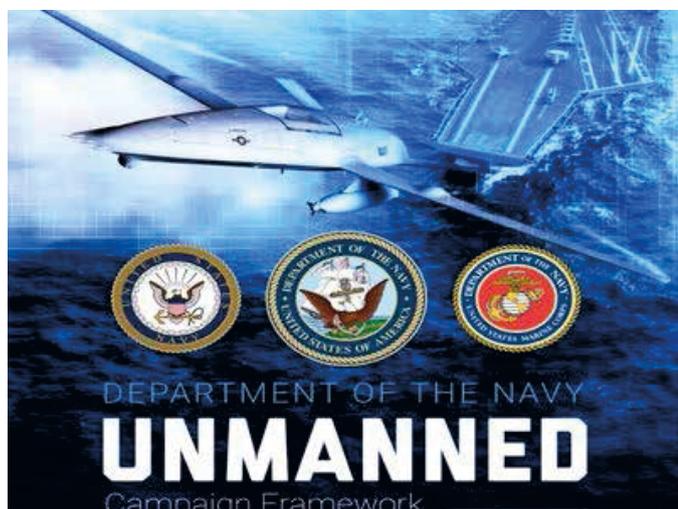
KOSHEL Konstantin Valentinovich, doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
Address: 43, Baltiyskaya Street, Vladivostok, 690041, Russia
Research interests: Geophysical hydrodynamics, vortex dynamics, radiophysics, wave theory, theory of random processes and field theory, dynamical systems theory
E-mail: kvkoshel@poi.dvo.ru
Phone: +7(924)131-25-02
ORCID ID: 0000-0002-8014-7699

НОВОСТИ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ



Астраханский государственный университет стал площадкой окружного этапа всероссийских соревнований по подводной робототехнике. Мероприятие, в котором участвовали школьники 5–8 классов, проходило в рамках проекта Кружкового движения НТИ «Инженерные конкурсы и соревнования по морской робототехнике». В обеих категориях (АНПА и ТНПА) первые места заняли команды местного ГАОУ АО ДО «Региональный? школьный? технопарк». Кроме Астрахани, подобные состязания прошли в Тюмени, Москве и Новосибирске, финал соревнований планируется провести во Владивостоке в мае для ТНПА и в Иннополисе в июне для АНПА.

<https://www.youtube.com/watch?v=R3ukgUxWOLs>



ВМС и Корпус морской пехоты США опубликовали документ “Department of the Navy Unmanned Campaign Framework”- своего рода план по превращению беспилотных систем в надежную и неотъемлемую часть боевых действий. Между тем, в конце февраля, компания General Dynamics поставила военным первый из пяти серийных противоминных комплексов типа Knifefish (по два АНПА Bluefin-21 в каждом). Первые демонстрации противоминных возможностей Bluefin-21 (тогда он назывался ВРАУВ) произошли ровно 20 лет назад, в марте 2001 г., в ходе учений Kernel Blitz.

https://www.defensedaily.com/wp-content/uploads/post_attachment/1062897.pdf



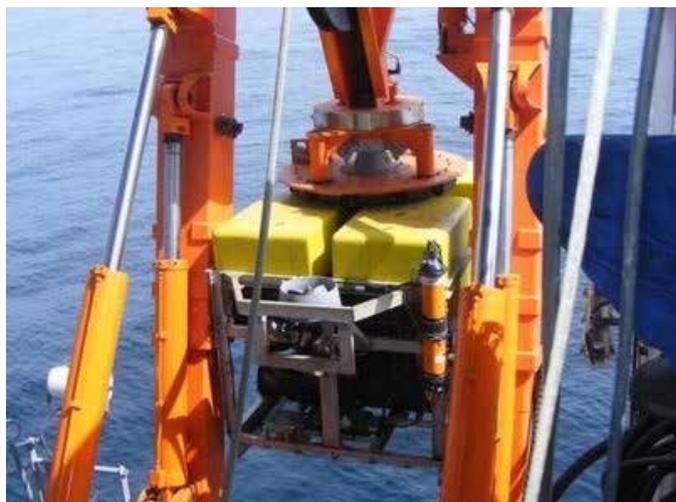
Завершилась экспедиция MANGAN 2021 в центральную часть Тихого океана, организованная Германским федеральным институтом геонаук и природных ресурсов (BGR) в рамках проекта MiningImpact. С многоцелевого судна Island Pride, оснащенного множеством инструментов, включая АНПА Kongsberg Hugin и ТНПА Schilling HD проводился мониторинг испытаний 1 : 4 масштабной модели (Pre-Prototype mining vehicle) комплекса для сбора конкреций - Patania II. Машина развёртывалась с судна Normand Energy бельгийской компании GSR в районе Кларин-Клиппертон, работала на участке дна 200×300 м, на глубине 4,5 км, а образующийся шлейф изучался с помощью НПА и других приборов.

https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/MarineRohstoffforschung/MiningImpact-Logbuch/aktuelles_inhaltsverzeichnis_node_en.html



Компании специализирующиеся на изысканиях и инспекциях под водой приобретают новые аппараты. Британская Modus разместила заказ на два АНПА SPICE (Subsea Precise Inspector with Close Eyes) у Kawasaki. Испытания этого, вновь созданного комплекса, состоялись меньше года назад. Кроме системы бесконтактной зарядки, SPICE оснащен манипулятором, что нетипично для АНПА. До этого, много лет, в Modus пыталась создать резидентные комплексы на базе АНПА Saab Sabertooth. Норвежская Argeo заказала два АНПА SeaRaptor 6000 у Teledyne Gavia, а в первом квартале этого года получила АНПА HUGIN 1000 от Kongsberg.

<https://www.youtube.com/watch?v=aERRAtuMZpY>



Индонезия с помощью Китая планирует поднять обломки затонувшей в 95 км от Бали подводной лодки KRI Nanggala 402, которая пропала во время учений 21 апреля и через 3 дня была обнаружена на глубине 850 м посредством ТНПА Super Spartan, мобилизованном на сингапурском спасателе M/V Swift Rescue.

<https://www.thejakartapost.com/news/2021/05/04/chinese-navy-to-help-salvage-sunken-kri-nanggala-402-submarine-.html>



Компания Dive Technologies продолжает разработку АНПА DIVE-LD, корпус которого состоит из 86 напечатанных на 3D-принтере композитных деталей. Комплект деталей (AUV-Kit) собирается в АНПА за 4 недели. Аппарат длиной 5,8 и диаметром 1,2 м имеет кубический метр объёма для полезной нагрузки и рабочую глубину 6 км. Месяц назад были проведены испытания установленного на аппарат ГБО СА Kraken MINSAS 120. Kraken, кроме того, поставляет для DIVE-LD скомпенсированные по давлению батареи SeaPower (93 кВт*ч), которые обеспечивают этому АНПА выбег в 500 миль.

<https://divetechnologies.com/>

Обзор подготовил Д.Г. Ляхов

К 90-летию академика М.Д. АГЕЕВА

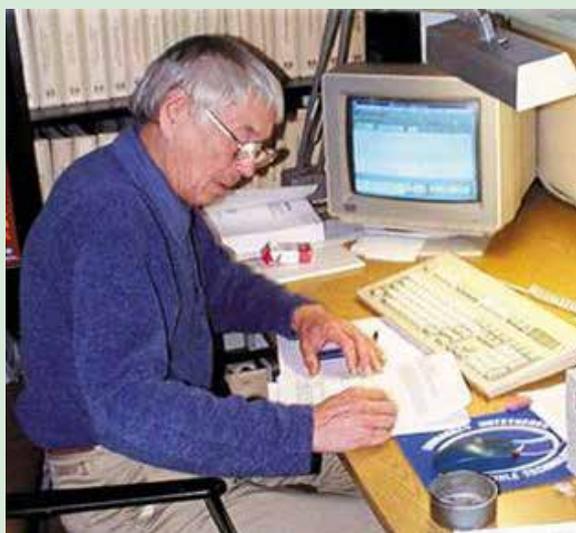


14 мая 2021 года организатору и первому директору ИПМТ ДВО РАН академику Михаилу Дмитриевичу Агееву исполнилось бы 90 лет. Коллектив института отдает дань памяти своему Учителю и выдающемуся руководителю. Дело, начатое им и ставшее нашим всеобщим достоянием, развивается в духе времени, и залогом этого служит общепризнанный авторитет основоположника подводной робототехники академика М.Д. Агеева. Михаил Дмитриевич прошел непростой жизненный путь, о котором он в связи с 70-летием поделился в виде воспоминаний «О времени и о себе», опубликованных в журнале «Вестник ДВО РАН» №2, 2001 г. За прошедшие 20 лет, из которых более 15 лет институт живет и работает без своего основателя, его авторитет по-прежнему служит опорой в новых сложившихся условиях.

Более 50 лет назад Михаилом Дмитриевичем Агеевым было заложено новое научное направление, основной целью которого стало создание автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). В период зарождения этого научного направления словосочетание «подводные роботы» только входило в научный обиход, а в наше время подводная робототехника приобретает черты самостоятельной отрасли, в которую вовлечены крупнейшие научные и производственные организации, фирмы, корпорации. История развития подводной робототехники насчитывает немало достопримечательных страниц, в которых отражена роль М.Д. Агеева как руководителя работ по созданию и практическому применению АНПА для исследования Мирового океана и выполнения широко круга прикладных работ в интересах различных отраслей. Вместе с тем им были заложены научные основы в области управления, навигации и системного анализа сложных подводно-технических комплексов, способных выполнять работу на больших и предельных глубинах, в мало определенной окружающей среде. Под руководством М.Д. Агеева были созданы подводные робототехнические комплексы, получившие мировое признание. По его инициативе и в силу назревших объективных обстоятельств на базе отдела в составе ИАПУ ДВО РАН был создан в 1988 году новый самостоятельный Институт проблем морских технологий. Под руководством М.Д. Агеева защищены докторские и кандидатские диссертации, опубликованы монографии, организовано издание научно-технического журнала «Подводные исследования и робототехника» и начата регулярная работа Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». В настоящее время ученики и последователи академика М.Д. Агеева успешно развивают заложенные им идеи и принципы создания сложных многофункциональных подводных робототехнических комплексов.

Научная школа академика М.Д. Агеева активно развивается в условиях, когда появляются новые, более сложные актуальные задачи по исследованию Мирового океана и выполнению практических работ по обслуживанию подводных инфраструктур и освещению подводной обстановки.

Выдающаяся роль академика М.Д. Агеева в создании и развитии подводной робототехники еще не до конца оценена, и, безусловно, его имя достойно увековечивания. В настоящее время именем академика Агеева названо новое крупное специализированное научно-исследовательское судно, оснащенное самыми современными техническими средствами для исследования морских глубин. Нет никаких сомнений, что институт, им созданный, также должен носить его имя. В этом есть и наш общий долг, и уверенность в том, что молодое поколение создателей подводной робототехники сохранит память о том человеке, с именем которого связана вся его деятельность.



ПАМЯТИ Юрия Геньевича СЕБТО

Коллектив ИПМТ ДВО РАН постигла большая невосполнимая утрата. 16 мая 2021 года на 66 году жизни скоропостижно скончался временно исполняющий обязанности директора института Юрий Геньевич Себто. Еще накануне этого трагического события он энергично руководил делами института, интересами которого он жил и трудился в течение многих лет, являясь вначале ученым секретарем института, а затем заместителем директора по научной работе.

Ю.Г. Себто родился 2 ноября 1955 года во Владивостоке. В 1978 году окончил ДВПИ им. В.В. Куйбышева и получил квалификацию инженера по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». Был распределен в ИАПУ ДВНЦ АН СССР, где работал инженером в отделе подводно-технических систем, руководимом М.Д. Агеевым. В 1981 году поступил в ДВПИ ассистентом на кафедру конструирования и производства радиоаппаратуры. В 1983–1985 годах проходил службу в рядах вооруженных сил в Закавказском военном округе. После окончания военной службы снова работал в ДВПИ, а затем с 1988 по 1992 год учился в аспирантуре в Ленинградском политехническом институте и защитил кандидатскую диссертацию по техническим наукам. С 1992 по 2000 год работал в ДВГТУ вначале в должности старшего преподавателя, а затем доцента кафедры конструирования приборов радиоаппаратуры. Как преподаватель вел занятия по различным дисциплинам по профилю кафедры. Его научно-методические труды в области информационных систем и технических систем искусственного интеллекта в течение ряда лет использовались в педагогической практике. В 2000 году Ю.Г. Себто был принят на работу в ИПМТ ДВО РАН на должность ученого секретаря, а с 2004 года переведен на должность заместителя директора ИПМТ по научной работе.

За многие годы, будучи в этой должности, Ю.Г. Себто непосредственно участвовал в создании подводного робототехнического комплекса, многие его разработки были опубликованы в научных трудах, докладах конференций, использованы в патентах на изобретения. Юрий Геньевич вел активную работу со студентами, привлекая их к научной деятельности, и пользовался заслуженным авторитетом и уважением в коллективе института. Ему нередко приходилось исполнять обязанности директора ИПМТ, и в этой своей деятельности он имел постоянную деловую связь с руководством ДВО РАН и руководителями других академических институтов, вузов и производственных организаций. До самых последних дней своей внезапно оборвавшейся жизни он с должной инициативой и ответственностью за деятельность института отдавался своей непростой работе и строил планы на будущее.



Светлая память о Юрии Геньевиче Себто сохранится в сердцах тех, кто его знал, с ним трудился ради того большого дела, которому он посвятил многие годы своей жизни.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Журнал «Проблемы инженерии в робототехнике» публикует научно-технические статьи, проблемные обзоры, дискуссионные материалы по всем направлениям, относящимся к методам и техническим средствам исследования в области робототехники, включая вопросы робототехнических комплексов, их системы, технологии и промышленные методы и средства мониторинга окружающей среды и морского дна, моделирования, морские исследования, военные вопросы робототехники, робототехнические комплексы и технические устройства. Все материалы в журнал направляются по адресу:

ИРРОНИ, г. Владивосток, ул. Суворова, 4а, НИИМТ ДВФУ РАН,
редакция журнала, тел. (8252) 9-400-874, факс (8252) 9-400-418,
e-mail: kinler@iamim.fobras.ru; imipr@iamim.fobras.ru

При подготовке материалов, направляемых в журнал, автор обязан руководствоваться следующими правилами:

ТЕКСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СТАТЬИ

Рукописи представляются в электронном виде с помощью электронной почты или на флэш-носителях. К рукописи прилагается сопроводительное письмо/заявление с возможностью опубликования в открытой печати и полные контактные данные автора (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, телефон, адрес электронной почты). В рукописи должны быть следующие сведения: УДК, название статьи, автор, организация, реферат, ключевые слова (два, кроме УДК, на двух языках). Текст выполняется в редакторе Microsoft Word шрифтом Times New Roman 12 кегля с одинарным межстрочным интервалом. Вся графическая, иллюстративная материал (рисунки, фотографии и др.) представляется отдельными файлами с использованием стандартных графических форматов в цвете или черно-белом виде. Все иллюстрации должны сопровождаться соответствующими подписями и обозначениями, поясняющими их суть, детали и привязку к тексту статьи. Для формул могут быть использованы два формата: Microsoft Equation, формулы со сложными символическими выражениями – в редакторе MathType. С учетом особенностей журнального формата следует избегать чрезмерно длинных математических выражений и громоздких схем, графиков, таблиц и других аналогичных иллюстраций. Цитируемая литература приводится в порядке ссылки на нее в тексте и оформляется согласно ГОСТ Р 7.1.4-2008. Объем рукописи не должен превышать, как правило, 16 стр. текста. В отдельных случаях редакция допускает увеличение объема до 18 стр. Редакция рекомендует сопровождать текст заголовками и подзаголовками, отсылающими статьи или отдельные ее положения.

Плата за опубликование статей не взимается.

Подробнее информации о формате и о оформлении рукописей смотрите на сайте журнала «Проблемы инженерии в робототехнике»: <http://imipr.fobras.ru>

