

# КООРДИНИРОВАНИЕ НЕПОДВИЖНОГО ГЛУБОКОВОДНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ МУЛЬТИЛАТЕРАЦИИ

Ю.В. Ваулин, Ф.С. Дубровин,  
М.А. Панин, О.Ю. Львов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup>

При решении многих задач в условиях глубокого моря возникает необходимость в координировании стационарно размещаемого на дне гидроакустического оборудования (маяков-ответчиков, донных станций и т.п.). К числу методов, обеспечивающих координирование подобных объектов, можно отнести метод мультилатерации. В ИПМТ ДВО РАН разработан программно-аппаратный комплекс, предназначенный для автоматизированного координирования донных маяков-ответчиков и глубоководных гидроакустических станций с использованием метода мультилатерации. Результаты натурных испытаний комплекса подтверждают работоспособность, высокую эффективность и точность координирования стационарных донных объектов с использованием метода мультилатерации по сравнению с методом трилатерации за счёт большего количества измерений дистанций и применения вероятностного подхода к оценке положения объекта. На основе полученных результатов дается оценка преимуществ и недостатков данного способа координирования.

## ВВЕДЕНИЕ

Точность работы гидроакустических навигационных систем (ГАНС) зависит от ряда факторов. К таким факторам относятся погрешность измерительной аппаратуры и погрешность априорных данных о профиле скорости звука в районе работ. Большое значение имеет точность определения координат опорных точек, роль которых могут играть маяки-ответчики

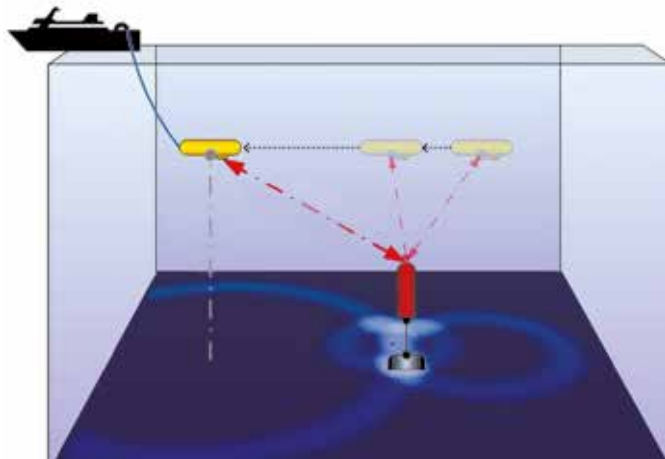


Рис. 1. Определение положения объекта по трём измерениям дальности буксируемым модулем

(МО) ГАНС, гидроакустические донные станции (ГДС) и прочие источники акустических сигналов. Измерение координат опорных точек является проблемой, особенно при их размещении в глубоководных районах [1, 2]. Координаты места сброса оборудования, зафиксированные с помощью приёмника спутниковой навигационной системы (СНС), могут значительно отличаться от координат точки, в которую попадёт оборудование при достижении дна из-за морских течений или асимметрии его корпуса. По этой причине после постановки оборудования на дно обычно выполняется процедура координирования с использованием различных методов [3–5]. Одним из наиболее распространенных методов координирования является трилатерация – вычисление координат объекта по измеренным дистанциям до трех опорных точек с известными координатами (рис. 1). В данной работе рассматривается метод координирования, основанный на измерении дистанций до множества опорных точек. Для обозначения данного метода можно применить термин «мультилатерация».

В первом разделе статьи описывается программно-аппаратный комплекс, разработанный в

<sup>1</sup> 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел./факс: + 7 (423) 243-24-16. E-mail: imtp@marine.febras.ru

ИПМТ ДВО РАН и предназначенный для измерения координат маяков и гидроакустических станций. Во второй части рассматривается метод автоматизированной мультилатерации, особенности алгоритмов и программной реализации, даётся оценка преимуществ и недостатков предложенного способа координирования. В третьем разделе приводятся некоторые результаты натурных испытаний.

### 1. Описание аппаратного комплекса

Комплекс для координирования неподвижного гидроакустического оборудования, разработанный в ИПМТ ДВО РАН (рис. 2), включает следующие компоненты:

- буксируемый подводный модуль (БПМ);
- лебёдку с грузонесущим кабель-тросом длиной 3 км и счётчиком длины кабеля;
- судовой пост управления и связи (ПУС).

Максимальная длина грузонесущего кабель-троса составляет 3 км, что обеспечивает возможность

использования комплекса в глубоководных районах и позволяет осуществлять буксировку БПМ на глубинах более 1000 м на горизонтах, расположенных гарантированно ниже «слоя скачка» в зоне уверенного приема акустических сигналов от донных маяков.

На буксируемом модуле установлена гидроакустическая аппаратура навигации и связи. Основная функция БПМ состоит в измерении дистанций до координируемого гидроакустического объекта в режиме запрос–ответ и передаче полученных данных на судно обеспечения. В случае необходимости БПМ может также использоваться для организации гидроакустического канала связи с координируемым объектом. В БПМ интегрированы датчик глубины, датчик скорости звука, комплект пилотажных датчиков (датчики крена, дифферента, магнитный компас), датчики контрольно-аварийной системы (измерители температуры, наличия воды в контейнерах, напряжения, силы электрического тока).

Судовой ПУС оснащён приёмником СНС, представляющим данные о координатах судна, путевой скорости, путевом угле и курсе судна. Передача дан-

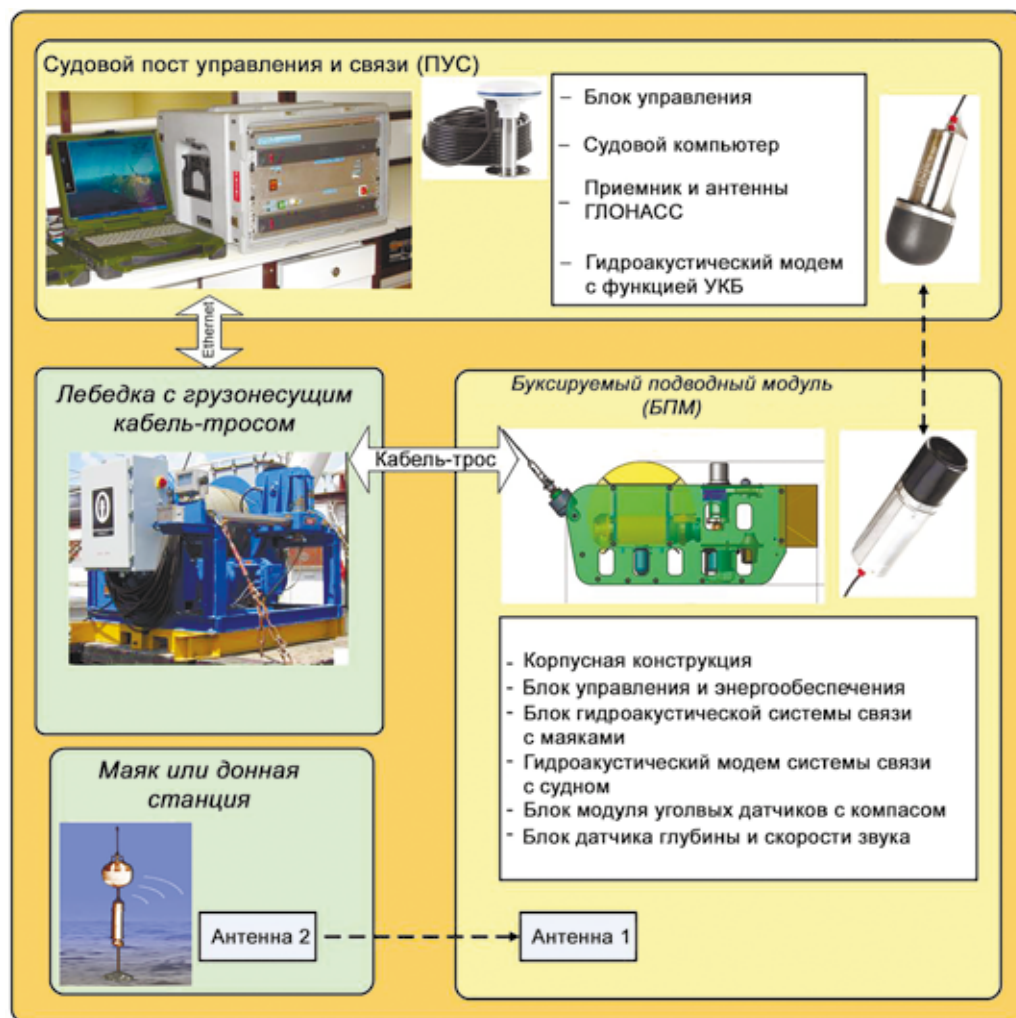


Рис. 2. Комплекс для координирования стационарного гидроакустического оборудования

ных между БПМ и судовым постом управления осуществляется по интерфейсу Ethernet по линии питания посредством PLC модемов.

Во время буксировки БПМ системе необходимо решать задачу расчёта его координат относительно судна [6]. Для измерения координат БПМ используется либо среднечастотная ГАНС УКБ Evologics [7], либо счисление координат БПМ на основе длины вытравленного кабеля, глубины погружения и курса БПМ.

Координирование БПМ по данным ГАНС УКБ подразумевает применение следующего оборудования: гидроакустического модема, установленного на БПМ, второго гидроакустического модема с функцией УКБ, жёстко закреплённого на корпусе судна, и двухантенного приёмника СНС NAVIS NV08C-RTK-A [8] с интегрированными датчиками положения для определения координат и угловой ориентации судна.

В том случае, если монтаж штанги с антенной ГАНС УКБ невозможен, применяется счисление координат БПМ на основе длины вытравленного кабеля, положения судна по приёмнику СНС, глубины и курса БПМ. Соответствующие алгоритмы расчёта описаны в [6, 9].

## 2. Координирование методом мультилатерации

Разработанный в рамках работы над комплексом алгоритм мультилатерации дает возможность производить оценку положения неподвижного источника гидроакустических сигналов в реальном времени. Входными данными выступают дистанции между

приёмником и источником сигналов. Входные данные рассчитываются по измерениям времени распространения сигналов между приёмником и источником сигналов, предполагаемой средней эффективной скорости звука в районе работ, а также предполагаемой глубине постановки координируемого объекта. По этим дистанциям в двумерной области («аккумуляторе») формируются кольца вероятности нахождения искомого объекта, а наиболее частое их пересечение считается скоординированным положением неподвижного подводного объекта. Подобная методика, разработанная ранее в ИПМТ ДВО РАН, применялась для выхода АНПА «Клаксин-1Р» в ледовых условиях к полынье возле обеспечивающего судна (ледокола) после завершения основной миссии [10]. Ширина колец вероятности выбирается исходя из прогнозируемой оценки погрешности измерения дистанций  $\sigma$ . При этом распределение величин вероятности формируется так, что в центре среза кольца располагаются наибольшие значения, а по периферии минимальные. Применение вероятностного подхода при решении задачи координирования обусловлено необходимостью фильтрации данных, чтобы минимизировать влияние на конечный результат ложных измеренных дистанций, возникающих вследствие сбоя аппаратуры, акустических помех и эффекта многолучевости.

Описанный выше метод можно также применять, если предполагаемая глубина постановки координируемого объекта неизвестна. В этом случае задача решается не на плоскости, а в пространстве и вместо колец вероятности в трехмерном «аккумуляторе» суммируются сферы вероятности. Однако следует учесть, что в этом случае существенно возрастают

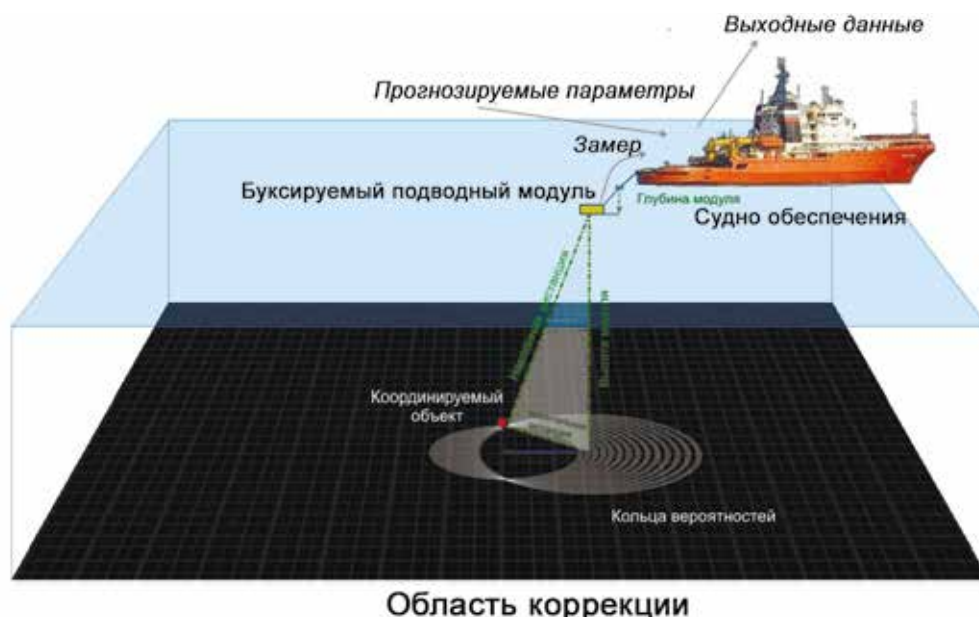


Рис. 3. Кольца вероятностей, сформированные по серии измерений





Рис. 4. Распределение вероятностей на поперечном срезе кольца вероятности

требования к вычислительным ресурсам и объему оперативной памяти компьютера.

Метод мультилатерации предназначен для работы с произвольно большой серией измерений в реальном времени (см. рис. 3). Поэтому алгоритм, реализующий метод, работает последовательно, генерируя после каждого измерения картину расположения колец вероятности, демонстрирующую схождения или расхождения упомянутых ранее колец. В реализации сделано допущение, что в поперечном срезе значения вероятностей распределены так, как показано на рис. 4 в соответствии с уравнением:

$$\theta \left( 1 - \left( 2 \frac{\sqrt{(x_a - x)^2 + (y_a - y)^2} - d_h}{w} \right)^2 \right), \quad (1)$$

где  $\theta$  – функция Хэвисайда,  $x_a$  – текущее значение  $x$  из аккумулятора,  $x$  – текущее значение  $x$  кольца вероятности,  $y_a$  – текущее значение  $y$  из аккумулятора,  $y$  –

текущее значение  $y$  кольца вероятности,  $d_h$  – расчетная горизонтальная дистанция,  $w$  – предполагаемая ширина кольца вероятности.

В реализации метода применён условно растровый подход. Пользователю предлагается задать размеры двумерной географической сетки со стороной ячейки, равной 1 м, в которую будут записываться вещественные вероятности нахождения координируемого объекта (для каждого измерения они образуют кольцо), накладывающиеся значения от разных измерений накапливаются и складываются друг с другом. Если вручную подобраны верные или близкие к ним значения скорости звука и глубины постановки координируемого объекта, то ячейка, содержащая максимальное значение вероятности, будет указывать на истинное (или близкое к таковому) положение координируемого объекта.

Для реализации метода на языке C++ в IDE Qt 5.10 разработано приложение. Для работы приложения используется интерфейс взаимодействия процессов, созданный в ИПМТ ДВО РАН [11]. Интерфейс пользователя реализован на базе WEB-вьюера. Выходные данные приложения отображаются в виде изображения, в которое переносится содержимое «аккумулятора» (т. е. кольца вероятности). Кольца вероятностей отображаются в оттенках серого в диапазоне от 0 (чёрный цвет) до 255 (белый). При этом участкам с максимальной вероятностью соответствует белый цвет на изображении, а для участков с минимальной вероятностью – чёрный. На изображении также красным цветом отображается координированное положение объекта, а синим – точки проведения измерений.

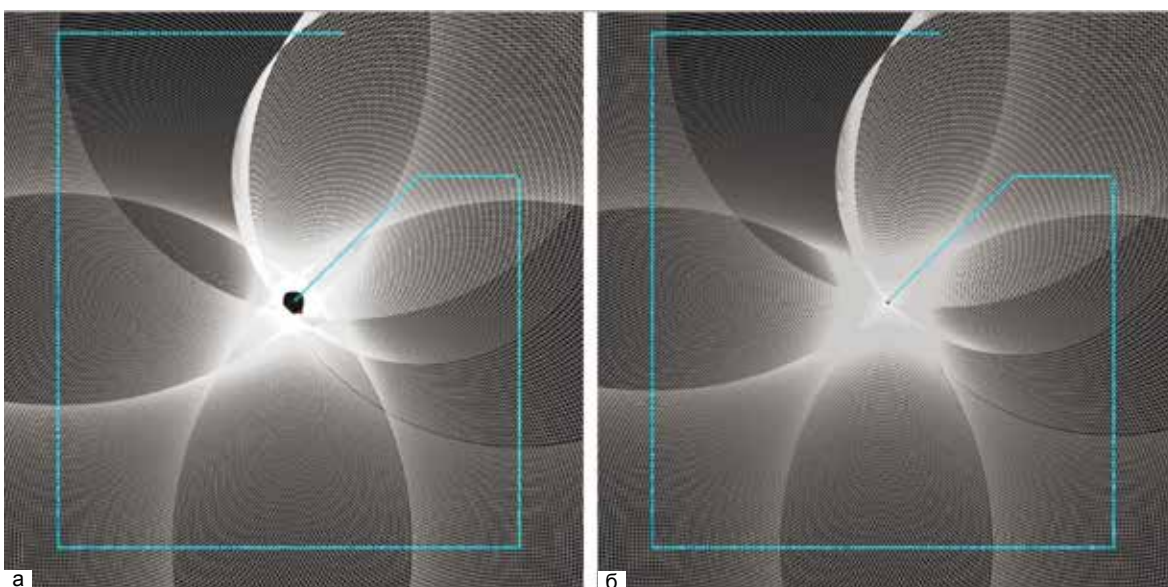


Рис. 5. Распределение колец вероятности при заданных завышенной (а) и оптимальной (б) скорости звука

Во время работы допускается корректировка исходных параметров, например, скорости звука. Корректировкой параметров нужно добиться пересечения большинства колец вероятности в одной точке. Примеры влияния погрешности заданной скорости звука на кольца вероятностей показаны на рис. 5.

Описываемый метод и программное обеспечение прошли проверку в морских условиях и показали свою эффективность.

Достоинствами данного метода являются:

- возможность координирования в реальном времени (после каждого измерения);
- устойчивость к искажённым измерениям, выпадающим из общего тренда изменения дистанций;



Рис. 6. Буксируемый модуль на борту НИС «Юрий Молоков»

- отсутствие строгих требований к форме траектории, описываемой судном обеспечения с буксируемым модулем.

Из недостатков метода можно отметить:

- зависимость от погрешности априорных данных о глубине координируемого объекта и от погрешности средней эффективной скорости звука в районе работ;
- сравнительно большая ресурсоёмкость.

### 3. Результаты морских испытаний

Первые результаты морских испытаний разработанного приложения получены в августе 2019 года в бухте Патрокл залива Петра Великого. Источник сигнала, гидроакустический модем в прочном корпусе

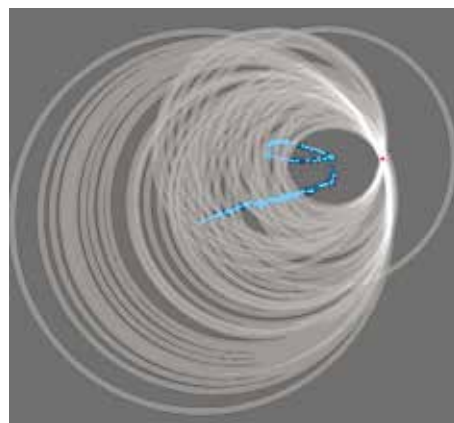


Рис. 7. Графический интерфейс программы расчета координат с траекториями движения судна и буксируемого модуля

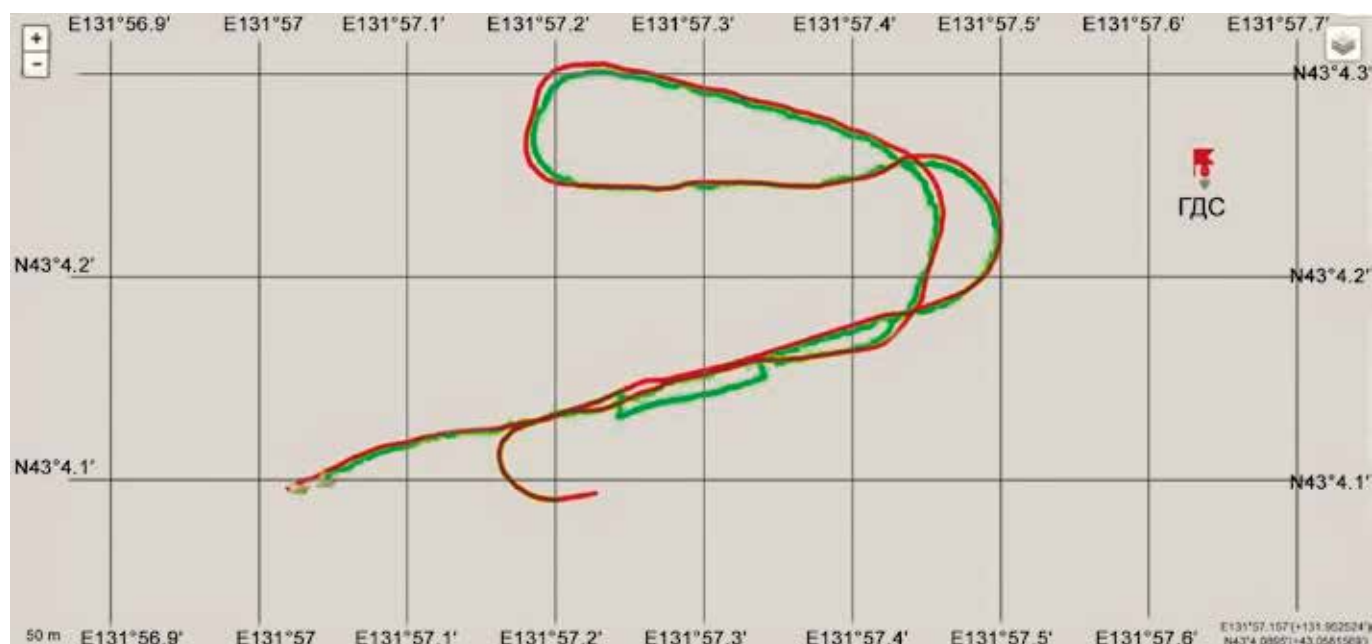


Рис. 8. Кольца вероятности нахождения имитатора донной станции

(имитатор ГДС), был погружен с пирса. Координаты источника были зафиксированы с помощью приёмника СНС с точностью 5–10 м. Буксировка БПМ осуществлялась научно-исследовательским судном «Юрий Молоков» прямолинейными галсами протяжённостью до 1 км в акватории с глубинами 15–25 м (рис. 6). Всего за время буксировки было осуществлено 55 измерений дистанций. Траектория буксировки показана на рис. 7. Результаты работы приложения, реализующего метод мультилатерации, приведены на рис. 8.

Из-за небольших размеров и глубины бухты траектория буксировки не была обширной. Несмотря на это были получены результаты, которые следует признать успешными. Погрешность оценки координат имитатора координируемого объекта составила 11 м, что сравнимо с точностью работы приёмника СНС в обычном режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Координирование неподвижных источников гидроакустических сигналов является необходимой процедурой, обеспечивающей высокую точность работы акустических навигационных средств АНПА. Описанный в статье метод и разработанное программное обеспечение позволяют эффективно решать данную задачу.

Предложенный метод мультилатерации позволяет существенно повысить точность координирова-

ния стационарных донных объектов по сравнению с методом трилатерации за счёт большего количества измерений дистанций и вероятностного подхода к оценке положения объекта. Метод показал свою работоспособность во время морских тестов. В дальнейшем предполагается модернизировать метод по следующим направлениям:

- ввести автоматическое «балансирование» размеров колец вероятности и подстройку параметров, в числе которых предполагаемая средняя эффективная скорость звука в районе работ, предполагаемая глубина постановки координируемого объекта, в том числе в трёх измерениях в реальном времени с распараллеливанием вычислений и применением, например, технологии OpenCL;
- снизить требования к вычислительным ресурсам и увеличить быстродействие алгоритмов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, № 7 «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники», а также гранта № 18-5-054 «Разработка методов синтеза информационно-управляющих систем подводных робототехнических средств для автоматического выполнения подводных операций в условиях частично неопределённого окружения» программы «Приоритетных научных исследований в интересах комплексного развития ДВО РАН».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hegrenæs Ø., Gadey K., Hageny O. K., Hagen P. E. Underwater Transponder Positioning and Navigation of Autonomous Underwater Vehicles // Proc. of the IEEE/MTS OCEANS 2009 Conference and Exhibition. Biloxi, USA, 2009.
2. McPhail S. D., Pebody M. Range-Only Positioning of a Deep-Diving Autonomous Underwater Vehicle From a Surface Ship // IEEE Journ. of Oceanic Engineering. 2009. Vol. 34, No. 4.
3. Olson E., Leonard J.J., Teller S. Robust Range-Only Beacon Localization // IEEE Journ. of Oceanic Engineering. 2006. Vol. 31, No. 4.
4. Ваулин Ю.В., Щербатюк Д.А. Координирование маяков-ответчиков ГАНС ДБ путем постобработки данных // Материалы 7-й Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток, 2017. С. 270–277.
5. Борейко А.А., Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Современные подходы к организации навигационного обеспечения работы морских робототехнических комплексов ИПМТ ДВО РАН // Материалы 13-й Конф. «Всероссийское совещание по проблемам управления». – URL: [https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Доклады%20ВСПУ-2019/18\\_B\\_A7/БорейкоАА.pdf](https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Доклады%20ВСПУ-2019/18_B_A7/БорейкоАА.pdf) (дата обращения: 12.02.2020).
6. Костенко В.В., Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Львов О.Ю. О точности определения координат подводного модуля на основе измеренных параметров движения буксируемой системы // Подводные исследования и робототехника (в настоящем номере)
7. EvoLogics S2C R 15/27 USBL communication and positioning device. – URL: <https://evologics.de/acoustic-modem/15-27/usbl-serie> (дата обращения: 12.02.2020).
8. Приемники (ОЕМ модули). NV08C-RTK-A. – URL: <http://nvs-gnss.ru/products/modules/item/81-nv08c-rtk-a.html> (дата обращения: 18.02.2020).
9. Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Мокеева И.Г., Матвиенко Ю.А., Рылов Н.И. Особенности координирования донных источников навигационных сигналов с использованием буксируемого антенного модуля // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 4–11.
10. Павин А.М. Автоматическое приведение автономного подводного робота к гидроакустическому маяку // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 1 (5). С. 32–38.
11. Ваулин Ю.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Павин А.М. Реконфигурируемая система управления и навигации для multifunctional подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1 (23). С. 4–13.