

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.С. Быкова, А.И. Машошин (Санкт-Петербург)

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения Мирового океана [1–8].

Наиболее актуально применение АНПА в районах, покрытых льдом, а также на больших глубинах, недоступных для подводных лодок.

Особое место среди АНПА занимают аппараты тяжелого класса, которые могут взять на себя многие функции, традиционно возлагавшиеся на специализированные надводные суда и подводные лодки. К этим функциям относятся:

- поиск полезных ископаемых на морских шельфах;
- доставка грузов в труднодоступные районы;
- прокладка подводных линий связи;
- поиск затонувших кораблей и самолетов;
- экологический мониторинг Мирового океана;
- исследование морской флоры и фауны;
- проведение подводных археологических исследований;
- охрана территориальных вод от несанкционированного вторжения иностранных подводных объектов;
- поиск и уничтожение морских мин, в том числе заиленных.

АНПА тяжёлого класса могут эффективно использоваться также в военной сфере, поскольку их применение хорошо вписывается в концепцию сетецентрической войны на море, возобладавшую в мире в последние десятилетия [9–11].

Поскольку АНПА являются автономно действующими подводными роботами, их создание сопряжено с решением значительного количества научно-технических проблем. При этом одним из ключевых вопросов является создание эффективной системы управления, назначение которой – обеспечить максимально точное выполнение предварительно загруженного маршрутного задания, представляющего собой разработанный человеком-оператором набор формализованных инструкций, привязанных ко времени и географическим координатам [12].

Вместе с тем точное выполнение маршрутного задания затруднено по целому ряду причин – как внешних, так и внутренних. К внешним относятся:

- отклонение АНПА от заданного маршрута, обусловленное погрешностями навигации, необходимостью расхождения с обнаруженными подвижными подводными объектами и обхода неподвижных препятствий;
- непредвиденное изменение скорости и/или направления течения, влекущие за собой изменения параметров движения АНПА;
- изменение границ ледового покрова, что препятствует всплытию для обсервации в назначенное время.

Большинство из перечисленных факторов приводит к дополнительным временным и энергетическим затратам и, в конечном счете, к необходимости корректировки маршрутного задания. Ситуация еще более осложняется в условиях преднамеренного противодействия выполнению миссии, что имеет место при применении АНПА в специальных операциях.

Внутренними факторами являются неустраняемые неисправности аппаратной части АНПА и невозможные сбои программного обеспечения, что также приводит к необходимости корректировки маршрутного задания, а в ряде случаев и к прекращению миссии.

Перечисленные негативные факторы, а также необходимость учитывать объем запасов электроэнергии, ограничения по скорости хода и глубине погружения, точность автономной навигации, дальность гидроакустической связи существенно осложняют принятие эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии. По этой причине система управления АНПА должна обладать способностью реализовывать сложные адаптивные алгоритмы с элементами искусственного интеллекта. И здесь возникает еще одна проблема. Формализованных методик синтеза подобных алгоритмов на сегодняшний день не существует. Есть только общие рекомендации по принципам их построения [13]. Такие алгоритмы во многом являются эвристическими, что переносит трудности с их разработки на их практическую отработку, а это не вписывается в сложившуюся в России практику создания сложной техники.

Система управления АНПА отличается высокой сложностью, обусловленной необходимостью управлять в реальном времени большим количеством разнородных радиоэлектронных и технических средств в полностью автоматическом режиме в условиях непрерывно меняющейся, зачастую агрессивной внешней среды и при ограниченных возможностях автономной подводной навигации и связи с пунктом управления [14].

Подходам к созданию системы управления АНПА как в России, так и за рубежом посвящено большое число публикаций, которое постоянно растет.

Известно [14, 15], что построить централизованную (мультиобъектную) систему управления действиями всех технических средств АНПА весьма затруднительно. Особенно это касается АНПА тяжелого класса, которые предназначены для работы на значительных расстояниях от базы и в широком диапазоне глубин и оборудованы сложной радиоэлектронной аппаратурой и большим количеством технических средств. Для таких АНПА подходит система управления с мультиагентной структурой [14-17].

Данная структура предполагает, что каждая система АНПА является самостоятельным интеллектуальным агентом с собственной системой управления. Чтобы обеспечить слаженное взаимодействие агентов, предусмотрен специальный агент-диспетчер, называемый программным комплексом управления – ПКУ [1], который должен своевременно посылать задания (команды) системам управления АНПА. Для выполнения поступившей команды система АНПА может привлекать другие системы либо запрашивать у них данные.

Далее с учетом результатов выполнения отданных команд диспетчер формирует новые. Если в процессе осуществления миссии выясняется, что в силу возникших обстоятельств выполнить маршрутное задание в точном соответствии с первоначальным планом не представляется возможным, диспетчер корректирует его.

На рис. 1 приведена структурная схема мультиагентной системы управления АНПА тяжелого класса, включающая, кроме диспетчера, четыре радиоэлектронные системы (навигации, освещения обстановки, радиосвязи и позиционирования, гидроакустической связи и позиционирования), а также четыре технические системы (генерации и распределения электроэнергии, движительно-рулевой комплекс, дифферентовки, аварийной сигнализации). В качестве диспетчера технических систем выступает система управления техническими средствами (СУТС), куда передаются все сложные алгоритмы управления, что позволяет упростить работу центрального диспетчера (ПКУ). При необходимости перечень систем АНПА может быть расширен, например, за счет систем сменной нагрузки.

Обмен данными в системе управления АНПА осуществляется по сети, что позволяет каждой системе иметь доступ ко всем данным.



Рис. 1. Структурная схема мультиагентной системы управления АНПА

Поскольку отработка алгоритмов, реализуемых системой управления АНПА, в реальных условиях затруднена, они должны отрабатываться путём моделирования с использованием специального стенда, воспроизводящего условия выполнения реальной миссии.

Целью доклада является краткое изложение технологии и результатов моделирования системы управления АНПА.

Описание технологии моделирования

Для моделирования системы управления АНПА, кроме высокопроизводительного сервера с развитой системой отображения, необходимо иметь:

- программную реализацию ПКУ;
- программные модели всех систем АНПА;
- программные имитаторы сигналов на выходе всех приёмных гидроакустических антенн, навигационных датчиков и датчиков других систем;
- программные имитаторы внешней обстановки, включая имитаторы подвижных и неподвижных объектов, гидроакустических условий;
- программные средства отображения в динамике внешних условий, траектории движения АНПА в трёхмерном подводном пространстве, работы диспетчера, функционирования каждой из систем АНПА.

Все перечисленные компоненты вошли в состав стенда моделирования, структура программного обеспечения (ПО) которого приведена на рис. 2. Стенд

реализован на базе высокопроизводительной цифровой вычислительной системы с распределённой архитектурой и развитой системой отображения.

Блоки, помещённые на рис. 2 в рамку с надписью "АНПА", являются программными моделями систем АНПА. Остальные блоки отвечают за моделирование входных сигналов антенн и датчиков АНПА с учетом гидроакустических условий распространения сигналов и помех, а также погрешностей их измерения. Каждый блок, независимо от того, какое ПО входит в его состав, имеет выход на отображение результатов моделирования.

Блоки, отвечающие за моделирование входных сигналов антенн и датчиков АНПА, имитируют:

- географические и гидроакустические условия в районе миссии АНПА;
- навигационно-гидрографические средства, установленные в районе (сигналы спутниковой и радио- навигационной систем, сигналы донных маяков-ответчиков, пассивные подводные ориентиры);
- подвижные подводные и надводные объекты;
- неподвижные препятствия (береговая черта, подводные горы);
- входные сигналы режимов гидролокации и шумопеленгования гидроакустической системы освещения обстановки;
- входные сигналы навигационных датчиков измерения курса, скорости, глубины АНПА и глубины под килём;
- входные сигналы систем радио- и гидроакустической связи;
- динамику расхода запаса электроэнергии;
- динамику выхода из строя технических средств АНПА.

Моделирование подвижных и неподвижных объектов предполагает расчет их движения и акустических полей (первичного и вторичного). Поведение подвижных объектов может быть как адаптивным (т.е. изменяться при обнаружении АНПА), так и неадаптивным (не изменяться).

В результате моделирования гидроакустического канала формируется лучевая структура шума объекта либо эхосигнала от него на входе приемных антенн гидроакустической системы освещения обстановки, а также лучевая структура шумов моря, поступающих на вход приемных антенн. При этом учитываются гидроакустические условия в районе и текущее взаимное расположение объектов и АНПА. С использованием сформированных лучевых структур моделируются цифровые сигналы на выходе каждого элемента приёмных гидроакустических антенн [18].

Моделирование радио- и гидроакустического каналов передачи сигналов связи и навигации осуществляется с учетом гидрометеорологических условий в районе выполнения миссии и возможностей аппаратуры, установленной на АНПА и на пункте управления.

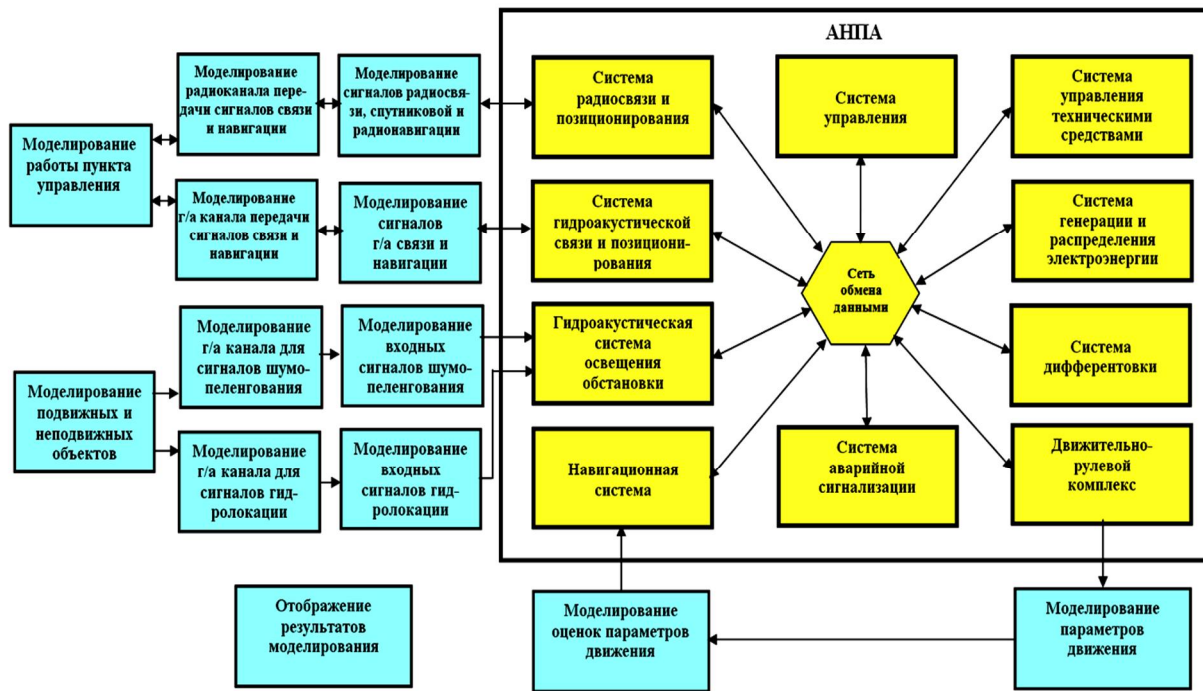


Рис. 2. Структура программного обеспечения стенда моделирования алгоритмов управления АНПА

Моделирование движения АНПА осуществляется следующим образом. Диспетчер в соответствии с маршрутным заданием и с учетом сложившейся обстановки выдает СУТС параметры движения АНПА, которые нужно установить. СУТС с использованием кинематической модели АНПА вырабатывает команды, которые передаются техническим системам АНПА для выполнения поступившего задания. Затем в соответствующем блоке моделируются параметры движения АНПА, которые реально удалось установить с учетом ограничений и возникших неисправностей технических средств. К ним в блоке моделирования оценок параметров движения добавляются систематические и случайные ошибки, характерные для навигационных приборов. Оценки параметров движения поступают в навигационную систему, выполняющую с их использованием штурманскую прокладку.

Результаты моделирования

Моделирование системы управления АНПА с использованием описанного выше стенда осуществлялось путём моделирования миссий АНПА, позволяющих отработать следующие элементы управления:

- взаимодействие между ПКУ и системами АНПА [19];
- взаимодействие между ПКУ и пунктом управления по радио и гидроакустическим каналам связи;
- движение по маршруту с учётом течения [19];
- позиционирование (коррекция координат) АНПА по сигналам спутниковых и радио навигационных систем, по сигналам донным маяков-ответчиков, по подводным пассивным ориентирам, по естественным геофизическим полям [20];
- поиск назначенных донных объектов с использованием гидроакустических, электромагнитных и оптических средств мониторинга дна (рис.3);

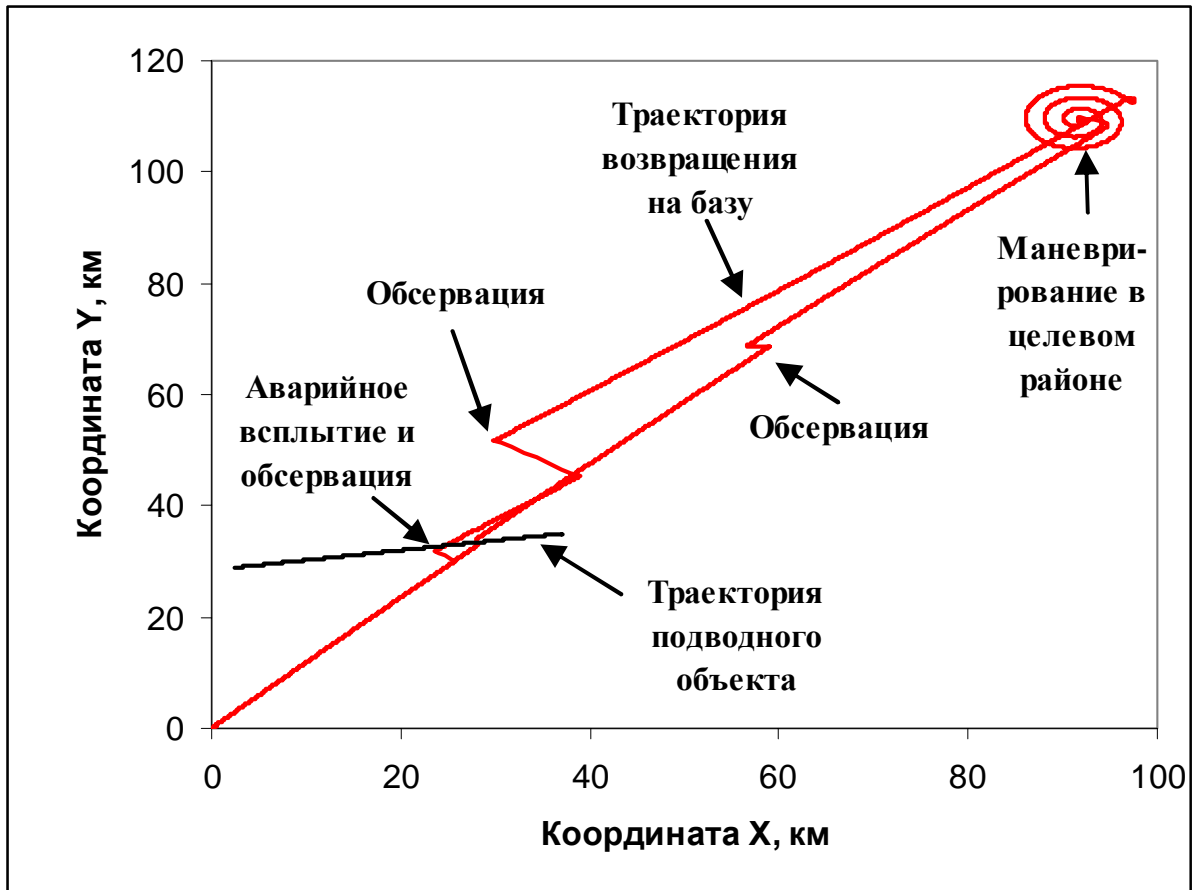


Рис. 3. Пример моделирования миссии АНПА, включающей движение в назначенный район, поиск в районе затонувшего самолёта, маневрируя по раскручивающейся спирали, и возвращение на базу

– обход навигационных препятствий в виде береговой черты, подводных возвышенностей, неровностей дна (при движении в непосредственной близости от дна), мусорных островов [21] (рис.4);

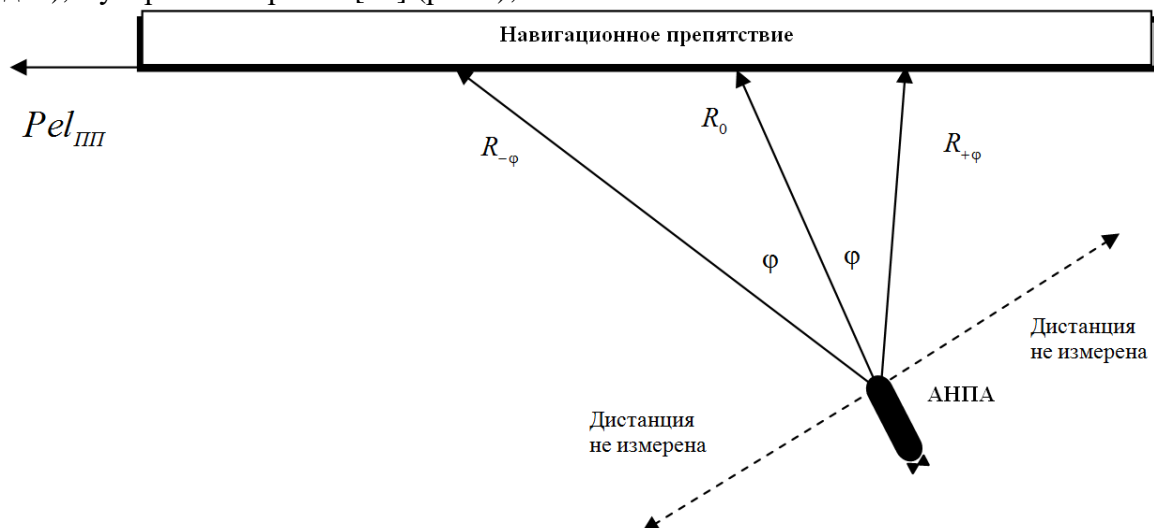


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма обхода АНПА протяжённого навигационного препятствия

- расхождение с маневрирующими подводными объектами [21];
- проводка судна через заминированный район [22] (рис.5);

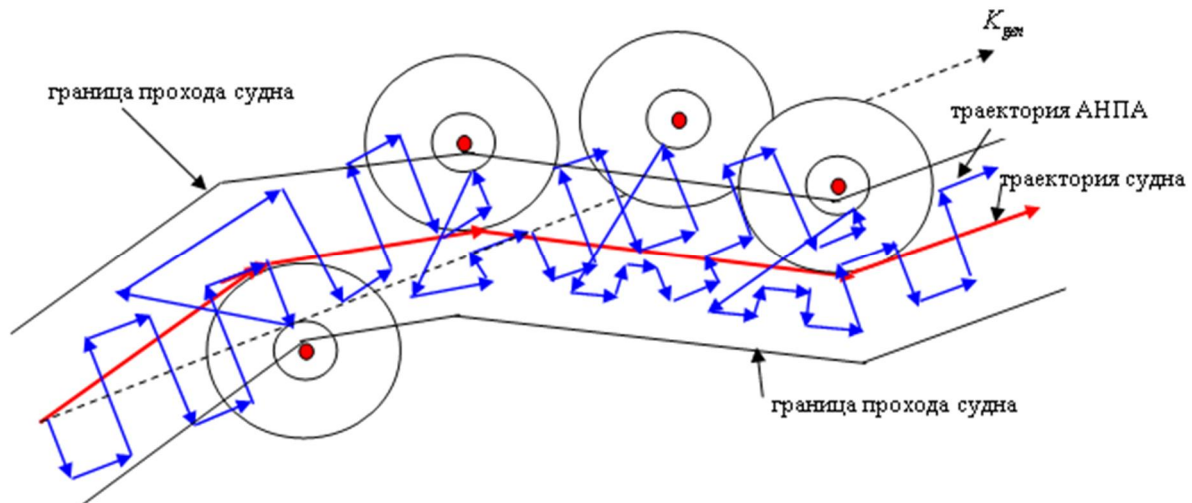


Рис. 5. Пример моделирования миссии АНПА по поиску прохода через заминированный район

- контроль за расходом запаса электроэнергии;
- контроль работоспособности систем АНПА с корректировкой маршрутного задания с учётом возникших неисправностей;
- оперативное изменение маршрутного задания по команде с пункта управления либо по инициативе ПКУ в силу возникших обстоятельств;
- аварийное прекращение миссии путём всплытия на поверхность либо покладки на грунт подо льдом.

Презентация доклада содержит отображение в динамике реализации одной из миссий АНПА, содержащей ряд из перечисленных элементов управления АНПА.

Заключение

Создание эффективной системы управления АНПА является одной из основных проблем в развитии подводной робототехники. Поскольку отработка алгоритмов, реализуемых системой управления АНПА, в реальных условиях затруднена, они должны отрабатываться путём моделирования с использованием специального стенда, адекватно воспроизводящего реальные условия выполнения миссий, включая внешние и внутренние причины, затрудняющие точное выполнение маршрутного задания.

Моделирование системы управления АНПА позволяет отработать её взаимодействие с системами АНПА и пунктом управления, а также алгоритмы управления при решении частных задач, из которых складывается миссия АНПА.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253).

Литература

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [отв. ред. Л.В. Киселев]. Владивосток: Дальнаука. 2018. 368 с.
2. **Инзарцев А.В. и др.** Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2 (4). С. 5-14.
3. **Боженков Ю.А.** Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. № 1. С. 4-68.

4. **Millar G., Mackay L.** Maneuvering Under the Ice // *Sea Technology*, 2015, vol.56, no.4, pp. 35 – 38.
5. **Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А.** Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2010. Т. 3. № 1. С. 4-13.
6. **Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.** Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с.
7. **Белоусов И.** Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // *Зарубежное военное обозрение*. 2013. № 5. С. 79-88.
8. **Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.** Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4. № 3. С. 37-48.
9. **Cebrowski A.K., Garstka J.J.** Network-centric warfare: its origins and future, U.S. Naval Institute Proceedings, 1998, № 1.
10. **Баулин В., Кондратьев А.** Реализация концепции «сетевая война» в ВМС США // *Зарубежное военное обозрение*. 2009. №6. С. 61-67.
11. **Буренок В.М.** Организационный и научно-технический базис сетевых войн // *Военный парад*. 2010. № 1. С. 14-17.
12. **Butler H., Daly M., Doyle A., Gillies S., Hagen S., Schaub T.** The GeoJSON Format, RFC 7946, The Internet Engineering Task Force. URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc7946>.
13. *Procedural Reasoning System User's Guide. A Manual for Version 2.0*, SRI International, 2001. URL: <http://www.ai.sri.com/~prs/prs-manual.pdf>.
14. **Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И., Павин А.М., Пашкевич И.В.** Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // *Подводные исследования и робототехника*. 2019. № 2 (28). С. 23-31.
15. **Innocenti V.** A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation, Universitat de Girona, 2009.
16. **Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.** Многоагентные системы (обзор) // *Новости искусственного интеллекта*. 1998. № 2. С.64-116.
17. **Ржевский Г.А., Скобелев П.О.** Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.
18. **Машошин А.И., Прокопович В.В., Шафранюк А.В.** Программный имитатор для создания и эксплуатации гидроакустического комплекса подводной лодки // *Морская радиоэлектроника*, 2020, № 1 (71). С. 20-24.
19. **Быкова В.С., Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Диспетчер мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата: структура, алгоритмы, результаты моделирования // *Гироскопия и навигация*. 2020. Том 28, № 3(110). С.109-121.
20. **Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Применение подводных пассивных ориентиров для навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // *Гироскопия и навигация*. 2020. Том 28, № 3 (110). С.95-108.
21. **Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Алгоритм обеспечения безопасности плавания автономного необитаемого подводного аппарата // *Гироскопия и навигация*. 2021. Том 29, № 1 (112). С.97-110.
22. **Быкова В.С., Машошин А.И., Пашкевич И.В.** Алгоритм управления автономным необитаемым подводным аппаратом при проходе через заминированный район // *Подводные исследования и робототехника*. 2021. № 1 (35). С.31-40.