УДК 004.89 DOI: 10.17587/mau.23.596-606

А. И. Машошин, д-р техн. наук, проф., aimashoshin@mail.ru,
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", г. Санкт-Петербург

Технологии искусственного интеллекта в задачах управления автономным необитаемым подводным аппаратом*

Целью работы является изложение опыта разработки с использованием технологий искусственного интеллекта (ИИ) алгоритмов, реализуемых в системе управления АНПА. Изложен взгляд автора на содержание понятия ИИ применительно к созданию сложных технических систем. Выделены две наиболее перспективные, по мнению автора, технологии ИИ: 1) разработка базового алгоритма и его совершенствование на основе результатов всестороннего моделирования в различных условиях эксплуатации; 2) создание проблемно-ориентированной искусственной нейронной сети и ее глубокое обучение с использованием большого количества экспериментально полученного обучающего материала. Констатируется, что обе технологии достаточно трудоемки и требуют продолжительного времени для реализации. Но если в технологии моделирования ключевую роль играет полнота и адекватность моделирования условий, в которых предполагается функционирование создаваемой системы, то в технологии машинного обучения на передний план выходит наличие достаточного количества обучающего материала (в случае разработки систем технического зрения — изображений распознаваемых объектов, число которых может исчисляться многими тысячами). В работе приведена структура мультиагентной системы управления АНПА, сделан акцент на сложности решаемых ею задач и необходимости применения при ее создании технологий ИИ. Показано, что из всех задач, решаемых системой управления АНПА, методы ИИ наиболее востребованы для решения двух категорий задач: 1) распознавания сложившейся на данный момент ситуации и принятия в этой ситуации адекватного решения в интересах выполнения маршрутного задания; 2) поиск назначенного донного объекта среди множества других донных объектов естественного и искусственного происхождения. Применение технологий ИИ продемонстрировано на примере разработки с использованием специально созданного стенда моделирования алгоритма управления АНПА при обходе протяженного препятствия. Предложено задачу обнаружения и распознавания назначенного донного объекта решать с применением технологии глубокого обучения проблемно-ориентированной искусственной нейронной сети с той особенностью, что обучающий материал формируется программным путем в виде цифровых изображений искомого донного объекта на выходе гидроакустических, оптических и электромагнитных средств мониторинга дна в различных условиях их наблюдения.

Ключевые слова: *автономный необитаемый подводный аппарат, искусственный интеллект, имитационное моделирование, искусственные нейронные сети, глубокое обучение*

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения Мирового океана [1—3].

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 возлагающиеся на специализированные надводные суда, подводные лодки и обитаемые подводные аппараты [4]. К этим функциям относятся:

— поиск полезных ископаемых на морском шельфе;

— 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.

АНПА тяжелого 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 [5—9].

При этом одним из ключевых вопросов создания АНПА является разработка эффективной системы управления, назначение которой — обеспечить максимально точное выполнение предварительно загруженного маршрутного задания, представляющего собой набор формализованных инструкций, привязанных ко времени и географическим координатам [9].

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

Сложность создания эффективной системы управления АНПА состоит в том, что 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;

— непредвиденные изменения 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 неисправности аппаратной части АНПА и неустранимые 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, глубине погружения, точности автономной навигации, дальности гидроакустической связи существенно осложняют принятие системой управления эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии. По этой причине система управления АНПА должна обладать способностью реализовывать сложные трудно формализуемые адаптивные алгоритмы. Из этого следует вывод, что при создании систем управления АНПА нельзя обойтись без применения технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Целью работы является изложение опыта разработки алгоритмов, реализуемых в системе управления АНПА, с применением технологий ИИ.

Что такое искусственный интеллект и как его применять на практике

Словосочетание "ИИ" является одним из часто употребляемых в наше время. Однако анализ публикаций показывает, что единства понимания, что такое ИИ и как его применять на практике, на сегодняшний день нет, в том числе и среди специалистов. Поэтому не будет лишним изложить взгляд разработчика систем управления АНПА на содержание ИИ применительно к его практическому использованию для создания сложных технических систем.

В мире развиваются два слабо связанных научных направления с одинаковым названием "ИИ". Первое из них, именуемое "сильным ИИ", ищет ответ на вопрос "Может ли машина мыслить?", который поставил в 1950 г. Алан Тьюринг, предложивший также тест (тест Тьюринга) для оценивания интеллекта машины [10, 11]. В этом направлении работают философы, психологи, нейрофизиологи, IT-специалисты.

Второе направление, называемое "слабым ИИ", рассматривает ИИ как набор технологий решения практических задач с использованием ЭВМ.

Термин "artificial intelligence (AI)" предложил в 1956 г. Джон МакКарти [12], основатель функционального программирования и разработчик алгоритмического языка символьных вычислений Lisp. При этом следует заметить, что МакКарти, предлагая термин AI, имел в виду не интеллект как способность мыслить (интеллект в английском языке определяется словом intellect), а способность получать полезную информацию (intelligence в английском языке используется в смысле получения необходимых данных, разведки). В результате некорректный перевод на русский язык термина AI привел к тому, что в русскоязычной литературе оба направления нередко трактуются как единое целое и, как следствие этого, под ИИ часто понимается создание программ для ЭВМ, имитирующих работу человеческого мозга, что сужает область применения ИИ. Далее будем вести речь только о втором направлении развития ИИ, т. е. о применении технологий ИИ для решения практических задач с использованием ЭВМ.

В СССР развитие ИИ началось в 60-х годах прошлого века [13]. Сначала исследования велись в рамках кибернетики. В конце 70-х годов ИИ был признан разделом вновь созданного научного направления информатики. Наиболее заметный вклад в развитие ИИ в СССР внесли Г. С. Поспелов, Д. А. Поспелов, С. Ю. Маслов.

Бум в развитии ИИ в мире наступил в последние десятилетия во многом благодаря рез-

кому росту характеристик ЭВМ и развитию метода глубокого обучения искусственных нейронных сетей [14, 15].

В России руководством страны утверждены Национальная стратегия развития ИИ и механизм ее реализации [16, 17]. Цель, поставленная в этих документах, — развитие отечественных технологий ИИ.

Международная конференция по ИИ Artificial Intelligence Journey вошла в топ международных научных конференций [18]. В 2020 г. в ней в online-режиме приняли участие более 20 тысяч ученых и специалистов со всего мира, в том числе Президент РФ В. В. Путин.

Применение ИИ в технике — это не что иное, как разработка алгоритмов решения с использованием ЭВМ сложных практических задач. Под сложностью задачи понимается многовариантность алгоритма ее решения и зависимость качества результата как от выбранного варианта, так и от некоторых изменяющихся внешних условий.

Попросту говоря, ИИ необходим в тех случаях, когда теоретически разработать эффективный (!) алгоритм решения задачи затруднительно. Наглядным примером этого является история разработки в разных странах мира программы для игры в шахматы. В 70-х годах прошлого века в СССР она создавалась коллективом высококвалифицированных специалистов под руководством экс-чемпиона мира, доктора технических наук М. М. Ботвинника. Однако несмотря на все усилия долгое время разрабатываемая программа проигрывала даже средним игрокам. И только в 1997 г. созданный в США с применением технологий ИИ шахматный процессор Deep Blue позволил со счетом 3,5:2,5 обыграть чемпиона мира Г. К. Каспарова [19].

ИИ дает положительный эффект в тех случаях, когда преимущества ЭВМ по быстродействию и объему памяти оказываются более важными, чем опыт, логика и интуиция человека.

Сегодня ИИ применяется для решения практических задач во многих областях человеческой деятельности. ИИ крайне востребован в военной сфере, поскольку наиболее сложные задачи, требующие применения ИИ, возникают при противоборстве с разумным противником.

Понятие ИИ тесно связано с понятием "робот". Под роботом понимается техническая система, как правило, перемещающаяся в пространстве, способная самостоятельно распознавать сложившуюся ситуацию и находить рациональное целенаправленное поведение в этой ситуации. Заметим, что под данное определение робота не подпадают безэкипажные технические системы, управляемые оператором по каналам связи.

Таким образом, ИИ — набор технологий решения сложных практических задач. Результатом применения ИИ является алгоритм решения задачи, реализованный в виде программы для ЭВМ.

В литературе описан широкий набор технологий ИИ, но среди них по продуктивности выделяются две — моделирование и машинное обучение.

Моделирование заключается в разработке специалистами в конкретной предметной области базовой версии алгоритма решения задачи и ее последующая доработка посредством всестороннего имитационного моделирования. Эта технология применяется, в первую очередь, для решения задач управления техническими системами в сложной обстановке. С использованием этой технологии была создана программа для игры в шахматы Deep Blue.

Машинное обучение позволяет выявлять закономерности в обучающем материале. На сегодняшний день из всех разновидностей машинного обучения на передний план выдвинулось глубокое обучение искусственных нейронных сетей (ИНС) [14, 15]. Для применения этой технологии специалисты в конкретной предметной области должны спроектировать (или выбрать готовую) ИНС, ориентированную на решение конкретной задачи, и провести ее глубокое обучение с использованием большого количества обучающего материала. Данная технология, в первую очередь, применяется в системах технического зрения для распознавания образов, например, лиц в толпе, наземных объектов по снимкам из космоса либо с самолета. Однако делаются попытки применять ее и в других областях и, более того, провозгласить ее основной технологией ИИ.

Обе описанные технологии достаточно трудоемки и требуют продолжительного времени для реализации. Но если в технологии моделирования ключевую роль играет полнота и адекватность моделирования условий, в которых предполагается функционирование создаваемой системы, то в технологии машинного обучения на передний план выходит наличие до-

статочного количества обучающего материала (в случае разработки систем технического зрения число изображений распознаваемых объектов может исчисляться многими тысячами).

Еще очень важен следующий момент. Алгоритмы решения практических задач, полученные путем машинного обучения, формируются автоматически и без возможности их корректировки (улучшения). В результате все пробелы в обучающем материале сказываются на их эффективности. При использовании технологии моделирования доводка алгоритмов до требуемого качества осуществляется осмысленно специалистами в соответствующей предметной области на основе анализа недостатков, выявленных в процессе моделирования. Из этого следует вывод, что при создании критических систем, от которых требуется высокая эффективность функционирования в любых условиях, целесообразно базироваться на технологии моделирования.

Объединяет обе рассмотренные технологии то, что специалист сначала должен разработать некий прообраз будущего алгоритма решения задачи, а затем, путем отработки на основе моделирования либо глубокого обучения, довести его до состояния, когда он будет обеспечивать требуемую эффективность.

Структура системы управления АНПА

Подходам к созданию системы управления АНПА как в России, так и за рубежом посвящено большое число публикаций, которое постоянно растет. Известно [20, 21], что построить централизованную (мультиобъектную) систему управления всеми радиоэлектронными и техническими средствами 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 широким набором радиоэлектронной аппаратуры и технических средств. Для таких АНПА наилучшим образом подходит система управления с мультиагентной структурой [22, 23].

Мультиагентная структура управления (рис. 1) 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) [23], который должен своевременно посылать задания (команды) системам АНПА (точнее их системам управления). 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 в точности выполнить маршрутное задание не представляется возможным, диспетчер корректирует его.

В силу децентрализации системы управления АНПА упрощаются алгоритмы, реализуемые диспетчером, и существенно сокращается объем данных, циркулирующих между диспетчером и системами АНПА.

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-рулевую, дифферентовки, аварийной сигнализации). В качестве диспетчера технических систем выступает система управления техническими средствами, куда передаются все сложные алгоритмы управле-

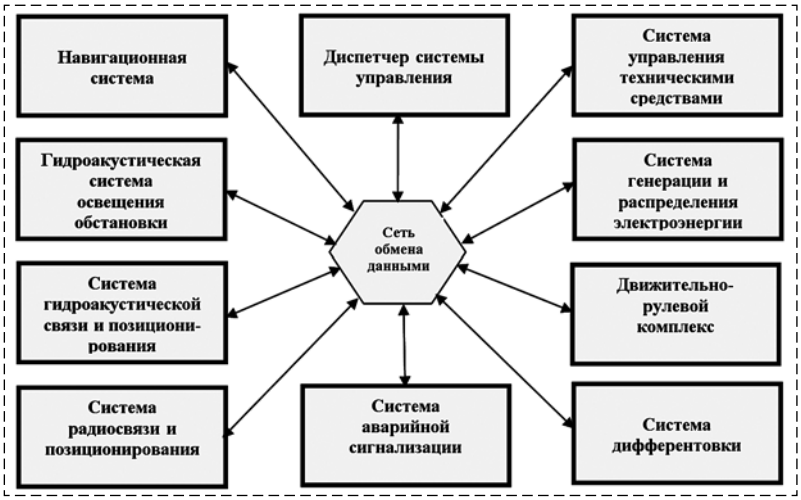

Рис. 1. Структурная схема мультиагентной системы управления АНПА
Fig. 1. The structure of the AUV multiagent control system

ния, что позволяет еще более упростить работу центрального диспетчера. 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.

Применение технологий искусственного интеллекта для создания системы управления АНПА

Из всех задач, решаемых системой управления АНПА, выделяются две задачи, требующие применения технологий ИИ:

1) разработка алгоритмов управления АНПА, обеспечивающих выполнение маршрутного задания на миссию в условиях сложившейся обстановки;

2) поиск и распознавание назначенного донного объекта среди множества других донных объектов естественного и искусственного происхождения.

Технология разработки алгоритмов управления АНПА, обеспечивающих выполнение маршрутного задания на миссию

Для решения этой задачи была выбрана технология моделирования по следующим причинам:

— поскольку от качества управления АНПА зависит как его безопасность, так и безопасность других обитателей океана естественного и искусственного происхождения, к системе управления АНПА предъявляются высокие требования;

— ситуации, возникающие в процессе миссии АНПА, складываются в результате воздействия комплекса внешних и внутренних факторов, при этом весь перечень возможных ситуаций предсказать затруднительно;

— получить достаточный объем обучающего материала для применения технологии глубокого обучения ИНС, особенно на стадии проектирования АНПА, не представляется возможным.

С учетом этих обстоятельств был создан специальный стенд моделирования на базе высокопроизводительного сервера с развитой системой отображения, состоящий из двух частей:

1) цифрового двойника системы управления АНПА, имеющего структуру, изображенную на рис. 1, но вместо реальных систем АНПА использующего их программные (цифровые) модели;

2) цифрового полигона, представляющего собой набор программных имитаторов, позволяющих максимально полно и адекватно имитировать:

— географические и гидроакустические условия в районе миссии АНПА;

— навигационно-гидрографические средства, установленные в районе (сигналы спутниковой и радионавигационной систем, сигналы донных маяков-ответчиков, пассивные подводные ориентиры);

— подвижные подводные и надводные объекты;

— неподвижные препятствия (береговую черту, подводные горы);

— сигналы на выходе приемных гидроакустических антенн системы освещения обстановки;

— сигналы на выходе навигационных датчиков измерения курса, скорости, глубины АНПА и глубины под килем;

— сигналы систем радио- и гидроакустической связи;

— динамику расхода запаса электроэнергии;

— динамику выхода из строя технических средств АНПА.

Рассмотрим задачу управления АНПА при обходе неподвижного препятствия, которую удалось решить путем моделирования с использованием разработанного стенда.

В качестве неподвижных препятствий могут выступать [24]:

— при плавании АНПА вдоль береговой черты — берег;

— при плавании в непосредственной близости от дна — неровности морского дна и затонувшие корабли;

— при плавании подо льдом — неровности нижней кромки льда;

— при плавании в высоких широтах — айсберги;

— при плавании в океанах — мусорные острова;

— при всплытии АНПА на поверхность — надводные корабли и суда, в том числе лежащие в дрейфе.

В известных публикациях [1, 25—28] данная задача рассматривается применительно к АНПА легкого класса, оснащенным высокочастотными впередсмотрящими гидролокато-

рами с узкими секторами обзора и с дальностью обнаружения препятствий не более 100 м. Наличие гидролокаторов указанного типа предполагает обход неподвижного препятствия путем огибания на небольшом расстоянии каждой неровности (рис. 2, *а*). В связи с этим основной проблемой, решаемой системой управления, является выбор скорости АНПА, при которой радиус его циркуляции позволит безопасно совершить маневр огибания очередной неровности. Ввиду этого время обхода неподвижного препятствия и, соответственно, энергетические затраты на эту операцию велики.

Для АНПА тяжелого класса, оборудованных мощной энергетической системой, развитыми средствами навигации и освещения подводной обстановки [4], появилась возможность решать рассматриваемую задачу путем заблаговременного обнаружения препятствия и безопасного его обхода на большой скорости, т. е. за минимальное время (рис. 2, *б*).

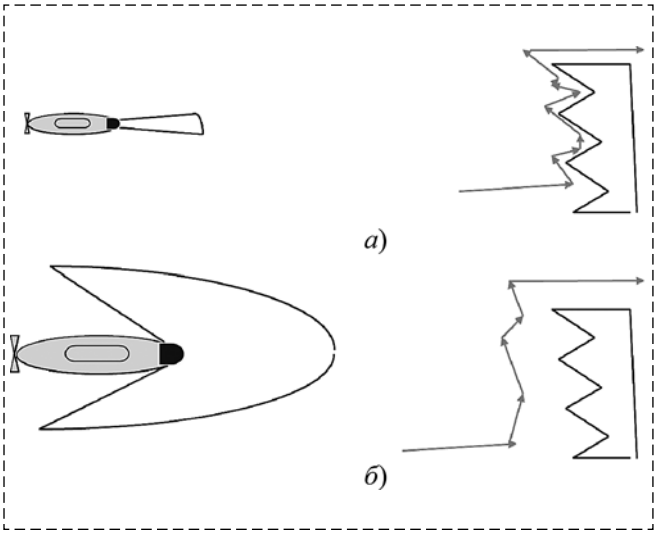

Рис. 2. Схема обхода препятствия:
а — АНПА легкого класса; *б* — АНПА тяжелого класса
Fig. 2. The scheme of obstacle avoidance:
а — by light AUV; *б* — by heavy AUV

Путем моделирования различных вариантов решения данной задачи был выбран наиболее эффективный вариант, состоящий в следующем [29]. В процессе плавания система управления АНПА с использованием гидролокатора контролирует наличие препятствий во всем секторе обзора гидролокатора. При обнаружении препятствия гидролокатор определяет сектор курсовых углов, в котором наблюдается препятствие. Если этот сектор соизмерим с шириной характеристики направленности антенны, система управления принимает решение об обнаружении точечного объекта (подвижного либо неподвижного) и организует расхождение с ним по правилам кораблевождения. При наблюдении препятствия в широком секторе курсовых углов препятствие признается протяженным.

Обход протяженного препятствия начинается с попытки преодолеть его путем изменения глубины [1]. Для этого при плавании подо льдом либо в районах, в которых высока вероятность наличия мусорных островов, АНПА, не изменяя курса, погружается на допустимую глубину (рис. 3, *а*), а в остальных районах всплывает на допустимую глубину (рис. 3, *б*). Если в процессе изменения глубины препятствие перестает наблюдаться, АНПА прекращает дальнейшее изменение глубины и продолжает движение прежним курсом.

Если маневрирование по глубине не привело к желаемому результату (например, в том случае, когда препятствие оказалось береговой чертой), АНПА приступает к обходу препятствия по горизонтали. Для этого, в первую очередь, определяется пространственная ориентация лицевой части препятствия. Это достигается измерением гидролокатором дистанции до препятствия на крайних курсовых углах сектора курсовых углов, в котором наблюдается препятствие (рис. 4, *а*). Затем в предположении, что лицевая часть препятствия представляет собой вертикально стоящую плоскость, рассчитывается пеленг Pel_{obst} линии пересечения этой плоскости с дном:

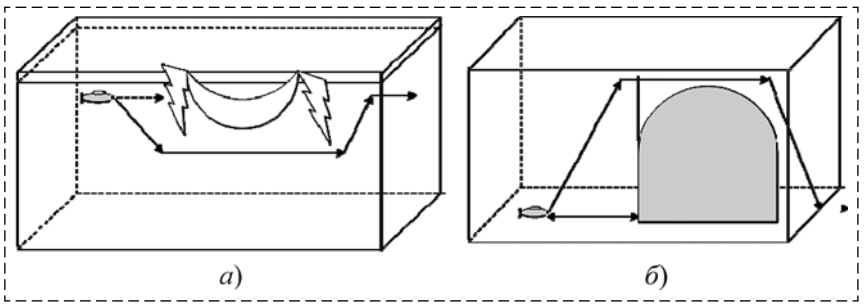

Рис. 3. Схема обхода протяженного препятствия путем изменения глубины:
а — при плавании подо льдом и в районах мусорных островов; *б* — в остальных районах
Fig. 3. The scheme of obstacle avoidance by depth changing:
а — when sailing under the ice; *б* — in regions of garbage islands

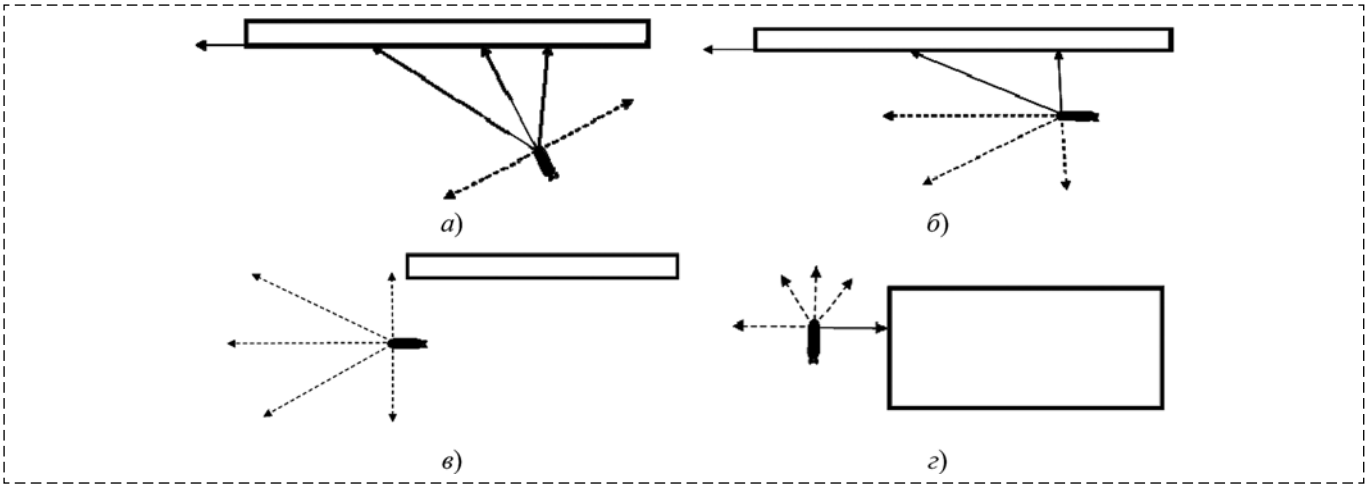

Рис. 4. Схема обхода протяженного препятствия без изменения глубины плавания
Fig. 4. The scheme of obstacle avoidance not changing the depth

$$Pel_{obst} = P_{left} - \arcsin \frac{R_{right} \sin[2(P_{right} - P_{left})]}{\sqrt{R_{left}^2 + R_{right}^2 - 2R_{left}R_{right} \cos[2(P_{right} - P_{left})]}}, \quad (1)$$

где P_{left}, P_{right} — пеленги, соответствующие крайнему левому и крайнему правому курсовым углам; R_{left}, R_{right} — дистанции, соответствующие пеленгам P_{left}, P_{right}.

Определив пространственную ориентацию препятствия, система управления АНПА выбирает направление движения вдоль линии Pel_{obst}, которое ближе к генеральному курсу АНПА, и ложится на курс обхода препятствия (рис. 4, *б*).

Поскольку на практике лицевая сторона препятствия не является плоскостью, система управления во время движения вдоль препятствия по данным гидролокатора по формуле (1) периодически уточняет ориентацию препятствия и корректирует курс АНПА так, чтобы расстояние от АНПА до препятствия не было меньше величины, содержащейся в базе данных системы управления.

Движение вдоль препятствия осуществляется до тех пор, пока препятствие не перестает наблюдаться гидролокатором (рис. 4, *в*). После этого АНПА прежним курсом должен пройти некоторую заданную дистанцию, а затем лечь на курс движения в целевую точку (рис. 4, *г*).

Технология решения задачи поиска и распознавание назначенного донного объекта

Задача поиска донных объектов возникает:

— при поиске затонувших кораблей, подводных лодок, самолетов и других объектов, оказавшихся на дне;

— при поиске и нейтрализации донных мин;

— при инспекции подводных сооружений, добывающих платформ, подводных трубопроводов и кабелей.

Сложность решения этой задачи состоит в том, что поиск назначенного объекта осуществляется путем его выявления (распознавания, идентификации) среди множества донных объектов естественного и искусственного происхождения. При этом для решения задачи используются средства мониторинга дна, работающие на разных физических принципах: многолучевых эхолоты, гидролокаторы бокового обзора (рис. 5), профилографы, электромагнитные искатели, телекамеры.

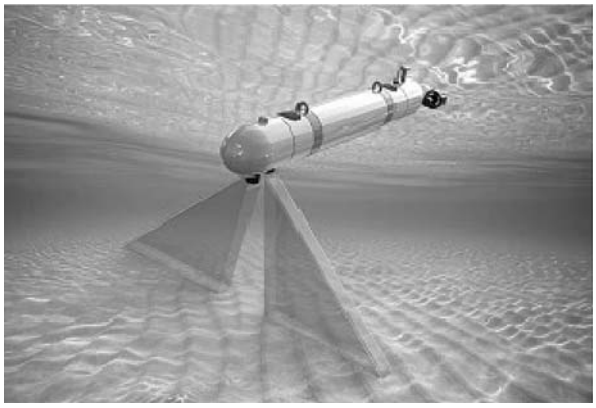

Рис. 5. Работа гидролокатора бокового обзора, установленного на АНПА
Fig. 5. A work of a side-view sonar, embedding on AUV

Однако каждое из этих средств имеет как достоинства, так и ограничения. В частности:

— многолучевой эхолот позволяет просматривать достаточно широкую полосу (до 200 м), но имеет низкую разрешающую способность, как правило, не позволяющую достоверно идентифицировать обнаруженный объект;

— гидролокатор бокового обзора имеет более высокую разрешающую способность, но более узкую полосу просмотра. К тому же он, как и многолучевой эхолот, не позволяет обнаруживать объекты под слоем ила;

— профилограф позволяет обнаруживать объекты под слоем ила, но имеет недостаточные разрешающую способность и полосу обследования;

— электромагнитные средства позволяют обнаруживать объекты с большой массой металла, но не позволяют идентифицировать их;

— оптические средства обладают высоким разрешением, потенциально достаточным для идентификации объекта, но требуют приближения к объекту на расстояние в несколько метров и наличия подсветки. Кроме того, они бесполезны, если объект поиска находится под слоем ила.

Поскольку поиск донных объектов является одной из основных задач, возлагаемых на АНПА, ее исследованию посвящено большое число публикаций в мировой научно-технической литературе. Однако в доступных источниках поиск донных объектов рассматривается применительно к использованию конкретного средства мониторинга дна, хотя выше было отмечено, что каждое средство имеет свои ограничения и, как правило, самостоятельно не позволяет эффективно решить рассматриваемую задачу.

Из этого следует естественный вывод, что эффективное решение рассматриваемой задачи возможно только при комплексном использовании средств мониторинга дна, работающих на разных физических принципах, при условии решения ряда научных проблем. В частности необходимо:

— определить оптимальную совокупность средств мониторинга дна для поиска различных объектов и обосновать их оптимальные технические характеристики и условия применения;

— разработать стратегию и алгоритмы управления АНПА при поиске назначенных донных объектов при комплексном использовании средств мониторинга дна, работающих на разных физических принципах;

— с использованием технологий ИИ разработать алгоритмы распознавания (идентификации) обнаруженных объектов путем совместной обработки данных, полученных различными средствами мониторинга дна.

На последней проблеме стоит остановиться особо. При разработке алгоритмов распознавания донных объектов не представляется возможным воспользоваться наработками, полученными при решении задач распознавания образов в надводной и наземной среде. В частности, нельзя получить достаточный банк экспериментально полученных изображений для разработки алгоритмов распознавания методом глубокого обучения искусственных нейронных сетей [14, 15]. Вместо этого в доступной литературе предлагается большое число эвристических методов. В работе [30] приведен обзор этих методов и одновременно предложена методика распознавания донных объектов путем выявления на снимках, полученных с помощью видеокамеры, характерных точек объекта, выбранных человеком путем анализа чертежа объекта. Однако натурные эксперименты, проведенные авторами работы [30], показали, что в реальных условиях бóльшая часть назначенных характерных точек не обнаруживается, ввиду чего распознавание осуществляется с недостаточно высокой достоверностью.

В результате выполненного анализа различных подходов к решению рассматриваемой задачи был сделан вывод, что наиболее перспективным путем решения задачи распознавания донных объектов все-таки является метод глубокого обучения искусственных нейронных сетей, но, учитывая специфику предметной области, обучение сети следует вести с использованием вместо изображений, полученных экспериментальным путем в реальных условиях, изображений, полученных на моделях объектов. Для этого необходимо научиться

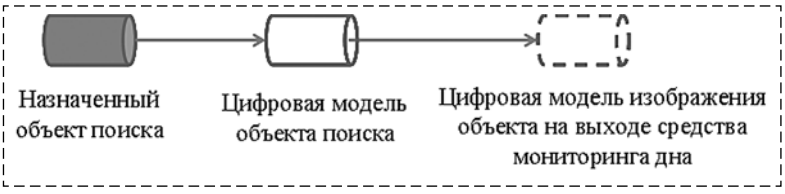

Рис. 6. Структура алгоритма формирования материала для глубокого обучения искусственной нейронной сети

Fig. 6. Structure of the algorithm for the formation of material for deep learning of an artificial neural network

оперативно создавать цифровые модели назначенных донных объектов, программным путем преобразовывать их в их цифровые изображения на выходе гидроакустических, оптических и электромагнитных средств мониторинга дна в различных условиях их наблюдения, а затем использовать эти цифровые изображения для глубокого обучения проблемно ориентированной искусственной нейронной сети (рис. 6).

Предварительные результаты такого подхода изложены в работе [31].

Заключение

АНПА являются перспективным средством изучения и освоения Мирового океана. Если говорить об АНПА тяжелого класса, то на них возлагаются практически те же задачи, которые решают обитаемые подводные аппараты. Ввиду этого система управления АНПА не должна уступать системе управления обитаемых подводных аппаратов. Из этого следует вывод, что при создании системы управления АНПА нельзя обойтись без применения технологий ИИ. В частности:

— для разработки алгоритмов распознавания сложившейся на данный момент ситуации и принятия в этой ситуации адекватного решения в интересах выполнения маршрутного задания на миссию в наилучшей степени подходит технология имитационного моделирования. Данный подход проиллюстрирован в работе на примере разработки алгоритма управления АНПА при обходе протяженного препятствия;

— для разработки алгоритмов поиска и распознавания назначенных донных объектов конструктивным видится применение технологии глубокого обучения проблемно-ориентированной искусственной нейронной сети с той особенностью, что обучающий материал формируется программным путем в виде цифровых изображений искомого донного объекта на выходе гидроакустических, оптических и электромагнитных средств мониторинга дна в различных условиях их наблюдения.

Список литературы

1. **Инзарцев А. В., Киселев Л. В., Костенко В. В., Матвиенко Ю. В., Павин А. М., Щербатюк А. Ф.** Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. 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. **Millar G., Mackay L.** Maneuvering Under the Ice // Sea Technology. 2015. Vol. 56, N. 4. P. 35—38.

4. **Аполлонов Е. М., Бачурин А. А., Горохов А. И., Пономарев Л. О.** О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сб. Матер. XIII Всеросс. науч.-практ. Конф. "Перспективные системы и задачи управления". Ростов-на-Дону — Таганрог: ЮФУ, 2018. С. 34—42.

5. **Jane's** unmanned maritime vehicle. 2019-2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK, 2020.

6. **Илларионов Г. Ю., Сиденко К. С., Бочаров Л. Ю.** Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП "Хабаровская краевая типография", 2011. 304 с.

7. **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.

8. **Cebrowski A. K., Garstka J. J.** Network-centric warfare: its origins and future // U. S. Naval Institute Proceedings. 1998. N. 1.

9. **Баулин В., Кондратьев А.** Реализация концепции "сетецентрическая война" в ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 6. С. 61—67.

10. **Тьюринг А.** Могут ли машины мыслить? М.: Госиздательство физ.-мат. литературы, 1960.

11. **Turing A.** Computing Machinery and Intelligence // Mind.1950. V. LIX, N. 236. P. 433—460.

12. **What** is Artificial Intelligence? URL: http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html.

13. **Искусственный** интеллект в СССР. URL: http://ai-news.ru/2017/10/iskusstvennyj_intellekt_v_sssr.html.

14. **Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А.** Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс, 2017. 652 с.

15. **Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е.** Глубокое обучение. СПб.: Питер. 2018. 480 с.

16. **Национальная** стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. Утверждена указом Президента РФ от 10 октября 2019 г. № 490.

17. **Концепции** развития регулирования отношений в сфере технологий искусственного интеллекта и робототехники до 2024 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 19 августа 2020 г. № 2129-р.

18. **Artificial** Intelligence Journey. URL: https:// ai-journey.ru

19. **Newborn M.** Deep Blue: An artificial intelligence milestone. Springer, 2003. 346 p.

20. **Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В.** Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64—116.

21. **Ржевский Г. А., Скобелев П. О.** Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. Самара: Офорт, 2015. 290 с.

22. **Innocenti B.** A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation, Universitat de Girona, 2009.

23. **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.

24. **Лаптев К. З., Илларионов Г. Ю.** Что может помешать подводному мореходству автономного необитаемого подводного аппарата // Сб. Матер. XIII Всеросс. науч.-практ. Конф. "Перспективные системы и задачи управления". Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2017. С. 138—146.

25. **Инзарцев А. В., Багницкий А. В.** Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Шестая Всерос. науч.- техн. конф. "Технические проблемы освоения мирового океана" (ТПОМО-6). Владивосток, 2015. С. 450—454.

26. **Тусеева И. Б., Тусеева Д. Б., Ким Юн-Ги.** Алгоритм динамического окна для навигации автономных подводных аппаратов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2013. № 3. С. 67—77.

27. **Galarza C., Masmitja I., Prat J., Gomariz S.** Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. P. 32—37.

28. **Lin C., Wang, H., Yuan J., Yu D., Li C.** An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance // IEEEJ.Ocean. Eng. 2019. Vol. 44. P. 120—133.

29. **Быкова В. С., Машошин А. И., Пашкевич И. В.** Алгоритм обеспечения безопасности плавания автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29, № 1 (112). С. 97—110.

30. **Инзарцев А. В., Панин М. А., Бобков В. А., Морозов М. А.** Модельное решение задачи инспекции объектов промышленного оборудования с помощью АНПА на базе методики видеораспознавания характерных точек // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 3 (37). С.23—35.

31. **Быкова В. С., Машошин А. И., Смирнов А. С.** Об одном подходе к распознаванию донных объектов с использованием средств мониторинга дна, установленных на автономном необитаемом подводном аппарате // Труды конференции "Автоматизация-2022" (в печати).

Artificial Intelligence Technologies in the Autonomous Underwater Vehicle Control Systems

A. I. Mashoshin, aimashoshin@mail.ru,
JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, 197046, Russian Federation

Corresponding author: **Mashoshin A. I.**, Dr. Tech. Sc., Chief of Research Center, JSC "Concern" Central Research Institute "Elektropribor", St. Petersburg, 197046, Russian Federation, e-mail: aimashoshin@mail.ru

Accepted on August 5, 2022

Abstract

The purpose of the paper is to present the experience of developing algorithms implemented in the AUV control system using artificial intelligence (AI) technologies. The author's view on the content of the concept of AI in relation to the creation of complex technical systems is presented. Two of the most promising, according to the author, AI technologies are identified: 1) development of the basic algorithm and its improvement based on the results of comprehensive modeling in various operating conditions; 2) creation of a problem-oriented artificial neural network and its deep learning using a large amount of experimentally obtained training material. It is stated that both technologies are quite time-consuming and require a long time to implement. But if the completeness and adequacy of modeling of the conditions in which the system being created is supposed to function plays a key role in modeling technology, then in machine learning technology, the availability of a sufficient amount of training material comes to the fore (in the case of developing vision systems — images of recognizable objects, the number of which can number many thousands).The paper presents the structure of the multi-agent control system of AUV, focuses on the complexity of the tasks it solves and the need to use AI technologies in its creation. It is shown that of all the tasks solved by the AUV control system, AI methods are most in demand for solving two categories of tasks: 1) recognition of the current situation and making an adequate decision in this situation in the interests of completing the route task; 2) search for the designated bottom object among many other bottom objects of natural and artificial origin. The use of AI technologies is demonstrated by the example of the development using a specially created simulation stand of the AUV control algorithm when bypassing an extended. It is proposed to solve the problem of detecting and recognizing a designated bottom object using deep learning technology of a problem-oriented artificial neural network with the peculiarity that the training material is formed programmatically in the form of digital images of the desired bottom object at the output of hydroacoustic, optical and electromagnetic means of monitoring the bottom in various conditions of their observation.

Keywords: *autonomous underwater vehicle, artificial intelligence, simulation, artificial neural networks, deep learning*

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project 22-29-00320).

For citation:

Mashoshin A. I. Artificial Intelligence Technologies in the Autonomous Underwater Vehicle Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2022, vol. 23, no. 11, pp. 596—606.

DOI: 10.17587/mau.23.596-606

References

1. **Inzartsev A. V., Kiselev L. V., Kostenko V. V., Matvienko Yu. V., Pa-vin A. M., Shcherbatyuk A. F.** Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications, Vladivostok, Dalnauka, 2018, 368 p. (in Russian).

2. **Inzartsev A. V.** et al. Application of an autonomous uninhabited underwater vehicle for scientific research in the Arctic, *Underwater research and robotics,* 2007, no. 2(4), pp. 5—14 (in Russian).

3. **Millar G., Mackay L.,** Maneuvering Under the Ice, *Sea Technology*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 35—38.

4. **Apollonov E. M., Bachurin A. A., Gorokhov I., Ponomarev L. O.** On the possibility and necessity of creating an ultra-large uninhabited underwater vehicle, *Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks",* Rostov-on-Don — Taganrog, SFU, 2018, pp. 34—42 (in Russian).

5. **Wong K. ed.** Jane's unmanned maritime vehicle, 2019-2020, IHS Markit, Coulsdon, Surrey, UK, 2020.

6. **Illarionov G. Yu., Sidenko K. S., Bocharov L. Yu.** Threat from the depths: XXI century, Khabarovsk, KGUP "Khabarovsk Regional Printing House", 2011, 304 p. (in Russian).

7. **Kuzmitsky M. A., Gizitdinova M. R.** Mobile underwater robots in solving Navy tasks: Modern technologies and prospects, *Fundamental and applied hydrophysics,* 2011, vol. 4, no. 3, pp. 37—48 (in Russian).

8. **Cebrowski A. K., Garstka J. J.** Network-centric warfare: its origins and future, *U. S. Naval Institute Proceedings*, 1998, no. 1.

9. **Baulin V., Kondratiev A.** Implementation of the concept of "network-centric war" in the US Navy, *Foreign Military Review*, 2009, no. 6, pp. 61—67 (in Russian).

10. **Turing A.** Can machines think? Moscow State publishing of physics.-mat. literature, 1960 (in Russian).

11. **Turing A.** Computing Machinery and Intelligence, *Mind*, 1950, V. LIX, no. 236. pp. 433—460.

12. **What** is Artificial Intelligence?, available at: http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html).

13. **Artificial** intelligence in the USSR, available at: http://ai-news.ru/2017/10/iskusstvennyj_intellekt_v_sssr.html) (in Russian).

14. **Goodfellow Ya., Benjio I., Courville A.** Deep learning, Moscow, DMK Press, 2017, 652 p. (in Russian).

15. **Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E.** Deep learning, St. Petersburg, Peter, 2018, 480 p. (in Russian).

16. **National** strategy for the development of artificial intelligence for the period up to 2030. Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 490, 17 dated October 10, 2019 (in Russian).

17. **The concept** of development of regulation of relations in the field of artificial intelligence and robotics technologies until 2024. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated August 19, 2020, No. 2129-p. (in Russian).

18. **Artificial** Intelligence Journey, available at: https:// ai-journey.ru

19. **Newborn M.** Deep Blue: An artificial intelligence milestone, Springer, 2003, 346 p.

20. **Gorodetsky V. I., Grushin M. S., Khabalov A. V.** Multi-agent system (review), *News of artificial intelligence*, 1998, no. 2, pp. 64—116 (in Russian).

21. **Rzhevsky G. A., Skobelev P. O.** How to manage complex systems? Multi-agent technologies for the creation of intelligent enterprise management systems, Samara, Etching, 2015, 290 p. (in Russian).

22. **Innocenti B.** A multi-agent distributed coordination with architecture for an Autonomous robot. Ph.D. dissertation, Universitat de Girona, 2009.

23. **Boreyko A. A., Inzartsev A. V., Mashoshin A. I., Pavin A. M., Pashkevich I. V.** Control system of large-scale autonomous autonomous vehicle based on a multi-agent approach, *Underwater research and robotics*, 2019, no. 2 (28), pp. 23—31 (in Russian).

24. **Laptev K. Z., Illarionov G. Yu.** What can hinder the underwater navigation of an autonomous uninhabited underwater vehicle, *Collection of materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Perspective systems and management tasks",* Rostov-on-Don, Southern Federal University, 2017, pp. 138—146 (in Russian).

25. **Inzartsev A. V., Bagnitsky A. V.** Algorithms for circumventing local bottom objects for an autonomous underwater robot, *Sixth All-Russian Scientific.- tech. conf. "Technical problems of the development of the world ocean" (TPOMO-6),* Vladivostok, 2015, pp. 450—454 (in Russian).

26. **Tuseeva I. B., Tuseeva D. B., Kim Yun-gi.** Dynamic window algorithm for navigation of autonomous underwater vehicles, *Artificial intelligence and decision-making*, 2013, no. 3, pp. 67—77 (in Russian).

27. **Galarza C., Masmitja I., Prat J., Gomariz S.** Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV, *Appl. Sci.*, 2020, vol. 10, pp. 32—37.

28. **Lin C., Wang H., Yuan J., Yu D., Li C.** An improved recurrent neural network for unmanned underwater vehicle online obstacle avoidance, *IEEEJ.Ocean. Eng.*, 2019, vol. 44, pp. 120—133.

29. **Bykova V. S., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V.** Safe Navigation Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles, *Gyroscopy and Navigation*, 2021, vol.12, no.1, pp. 86—95 (in Russian).

30. **Inzartsev A. V., Panin M. A., Bobkov V. A., Morozov M. A.** Model solution of the problem of inspection of industrial equipment facilities with the help of ANPA based on the method of video recognition of characteristic points, *Underwater research and robotics,* 2021, no. 3 (37), pp. 23—35 (in Russian).

31. **Bykova V. S., Mashoshin A. I., Smirnov A. S.** One approach to the recognition of bottom objects using monitoring systems installed on an autonomous underwater vehicle, *Proc. RusAutoCon-2022* (in press).