

**Гайдук Анатолий Романович** – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: gaiduk\_2003@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; д.т.н.; профессор; ведущий научный сотрудник.

**Медведев Илья Михайлович** – Южный федеральный университет; e-mail: imedvede@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; студент.

**Косенко Евгений Юрьевич** – НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; старший научный сотрудник.

**Medvedev Mikhail Yurjevich** – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: medvmihal@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; leading researcher.

**Pshikhov Viacheslav Khasanovich** – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: pshichop@rambler.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; professor; director.

**Gaiduk Anatoly Romanovich** – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: gaiduk\_2003@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; dr. of eng. sc.; professor; leading researcher.

**Medvedev Ilya Mikhailovich** – Southern Federal University; e-mail: imedvede@sfedu.ru; Taganrog, Russia; student.

**Kosenko Evgeniy Yurjevich** – R&D Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University; e-mail: ekosenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI 10.18522/2311-3103-2026-2-201-212

**В.С. Быкова, А.И. Машошин**

#### **АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ НЕОБИТАЕМОМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ ПРИ ПОИСКЕ НАЗНАЧЕННОГО ДОННОГО ОБЪЕКТА ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ДНА**

*Поиск назначенных донных объектов является одной из наиболее сложных задач, решаемых АНПА, что обусловлено рядом факторов, основными из которых являются: разнообразие объектов поиска (затонувшие подводные лодки, надводные корабли, самолёты, вертолёты, мины, подводные трубопроводы и кабели связи, различная подводная инфраструктура), необходимостью комплексного использования для поиска различных средств мониторинга дна, отличающихся физическими принципами функционирования, разрешающей способностью и поисковой производительностью. Целью работы, результаты которой приведены в статье, была разработка алгоритма управления АНПА при поиске назначенного донного объекта, удовлетворяющего этим требованиям, и его проверка с использованием цифрового полигона и цифрового двойника АНПА. В качестве критерия выбора средства мониторинга дна в каждом конкретном случае была принята вероятность правильного отнесения обнаруженного донного объекта к объекту поиска. В результате логика поиска назначенного донного объекта выглядит следующим образом. Осуществляется поиск донных объектов средством с максимальной производительностью поиска. При обнаружении донного объекта определяется вероятность его принадлежности объекту поиска. Если она больше заданного высокого порога, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта. Если же она меньше заданного низкого порога, принимается решение, что обнаружен посторонний объект. В остальных случаях принимается решение о необходимости обследования объекта средством с большей разрешающей способностью. Описана технология классификации донных объектов на основе обучения искусственной нейронной сети с использованием синтезированного обучающего материала. Приведены результаты проверки эффективности разработанного алгоритма с использованием цифрового полигона и цифрового двойника АНПА. Выполненное моделирование разработанного алгоритма показало, что комплексное использование средств мониторинга дна повышает вероятность успешного решения задачи и сокращает время её решения.*

*АНПА; система управления АНПА; поиск назначенных донных объектов; алгоритм классификации донных объектов; искусственная нейронная сеть; цифровой полигон; цифровой двойник.*

V.S. Bykova, A.I. Mashoshin

# AN ALGORITHM FOR CONTROLLING AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WHEN SEARCHING FOR A DESIGNATED BOTTOM OBJECT WITH THE INTEGRATED USE OF VARIOUS BOTTOM MONITORING TOOLS

*The search for designated bottom objects is one of the most difficult tasks solved by the AUV, due to a number of factors, the main of which are: the variety of search objects (sunken submarines, surface ships, airplanes, helicopters, mines, underwater pipelines and communication cables, various underwater infrastructure), the need for integrated use for search for various bottom monitoring tools that differ in their physical principles of operation, resolution, and search performance. The purpose of the work, the results of which are presented in the article, was to develop an algorithm for managing the AUV when searching for a designated bottom object that meets these requirements, and to verify it using a digital polygon and a digital twin of the AUV. The probability of correctly attributing the detected bottom object to the search object was chosen as a criterion for choosing a bottom monitoring tool in each specific case. As a result, the logic of searching for a designated bottom object is as follows. The search for bottom objects is carried out using a tool with maximum search performance. When a bottom object is detected, the probability of its belonging to the search object is determined. If it exceeds the set high threshold, a decision is made to locate the designated bottom object. If it is less than the specified low threshold, it is decided that an extraneous object has been detected. In other cases, a decision is made on the need to examine the object with a higher resolution. The technology of classification of bottom objects based on the training of an artificial neural network trained using synthesized training material is described. The results of checking the effectiveness of the developed algorithm using a digital polygon and a digital twin of AUV are presented. The simulation of the developed algorithm showed that the integrated use of bottom monitoring tools increases the likelihood of a successful solution to the problem and reduces the time needed to solve it.*

*AUV; AUV management system; search for assigned bottom objects; bottom object classification algorithm; artificial neural network; digital polygon; digital twin.*

**Введение.** Поиск назначенных донных объектов является одной из наиболее сложных задач, решаемых АНПА, что обусловлено следующими факторами:

- ◆ перечень типов объектов поиска не ограничен. При этом объект поиска может находиться как на поверхности дна, так и под слоем ила;
- ◆ координаты объекта поиска могут быть указаны с большими ошибками, вплоть до размеров большого района;
- ◆ учитывая, что разные средства мониторинга дна, основанные на разных физических принципах, обладают разной разрешающей способностью и разной поисковой производительностью (причём, чем больше разрешающая способность, тем меньше поисковая производительность, равная произведению ширины обследуемой полосы дна на скорость движения АНПА), эффективное обнаружение назначенного донного объекта за ограниченное время возможно только при комплексном использовании нескольких средств мониторинга дна, обладающих разными разрешающими способностями и поисковыми производительностями. Ввиду этого для решения рассматриваемой задачи, как правило, применяются АНПА тяжёлого класса (ТК), поскольку только они способны нести широкий спектр средств мониторинга дна;
- ◆ отдельной проблемой является распознавание назначенного донного объекта среди множества предметов, лежащих на дне.

При этом необходимо особо акцентировать, что решаемая практическая задача заключается не в обнаружении любых объектов, лежащих на дне, а в нахождении именно назначенного объекта.

В качестве назначенных объектов поиска могут выступать:

- ◆ затонувшие подводные лодки, надводные корабли, суда различного водоизмещения, самолёты и вертолёты;
- ◆ подводные трубопроводы и кабели связи;
- ◆ мины;
- ◆ различная подводная инфраструктура.

Задача поиска назначенных донных объектов с применением АНПА состоит из двух взаимосвязанных задач:

- 1) управление поведением АНПА при поиске донных объектов;
- 2) классификация обнаруженных донных объектов.

В литературе этим задачам посвящено достаточное количество публикаций [1–14], но все же остается открытым вопрос эффективности решения поставленной задачи АНПА, которая оценивается двумя показателями – вероятностью обнаружения назначенного объекта и временем, за которое она достигается.

К алгоритму, отвечающему за решение этой задачи, предъявляются следующие требования: он должен так организовать поиск, чтобы объект был обнаружен с вероятностью, не менее заданной, за время, не превосходящее заданное.

Целью работы, результаты которой приведены в статье, была разработка алгоритма управления АНПА при поиске назначенного донного объекта, удовлетворяющего этим требованиям, и его проверка с использованием цифрового полигона и цифрового двойника АНПА.

**1. Описание алгоритма поиска назначенного донного объекта.** Современные АНПА тяжелого класса, как правило, оснащены пятью типами средств мониторинга дна: тремя гидроакустическими (многолучевой эхолот – МЛЭ, гидролокатор бокового обзора – ГБО и профилограф – ПФ) (рис. 1), электромагнитным искателем (ЭМИ) и телекамерой с прожектором (ТК).

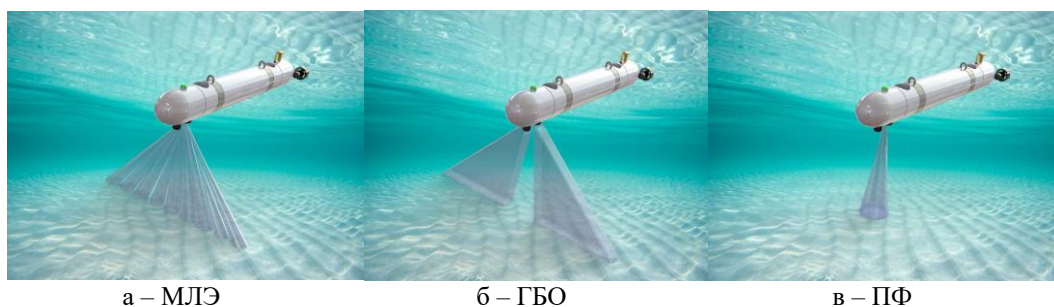


Рис. 1. АНПА обследуют дно гидроакустическими средствами мониторинга дна

Из перечисленных средств мониторинга дна наибольшую разрешающую способность имеет телекамера ТК. Однако для её использования АНПА должен двигаться на расстоянии от дна не более 5 м, обследуя полосу менее 10 м. Далее в сторону уменьшения разрешающей способности идёт ГБО, используемый на расстоянии до 100 м от дна. Он обследует полосу шириной 200 м. Наименьшей разрешающей способностью обладает МЛЭ, при использовании которого АНПА может двигаться на расстоянии до 200 м от дна, освещая полосу до 400 м.

При поиске затонувших объектов используется однолучевой либо многолучевой ПФ, который обследует полосу 20 м. Также при поиске затонувших объектов применяется ЭМИ, способный обнаруживать подводные кабели под напряжением и объекты, обладающие большой магнитной массой. ЭМИ обследует полосу до 30 м.

В известных публикациях, касающихся рассматриваемой задачи [15–18], не подвергается сомнению, что для эффективного поиска донных объектов должен применяться комплекс средств мониторинга дна, основанных на разных физических принципах. Вместе с тем, ряд принципиальных вопросов, связанных с поиском донных объектов, в публикациях остался без ответа. В частности:

- ♦ на основании каких критериев следует использовать то или иное средство мониторинга дна?
- ♦ каким образом осуществлять классификацию назначенных донных объектов?

Ввиду этого перед разработкой алгоритма поиска донных объектов была поставлена задача ответить на эти вопросы.

В первую очередь, потребовалось разработать алгоритм управления АНПА при поиске донных объектов, обеспечивающий компромисс между вероятностью обнаружения донного объекта и временем её достижения.

Для этого исследовалась связь между поисковой производительностью различных средств мониторинга дна и обеспечиваемой ими вероятностью правильной классификации различных типов объектов.

Поисковая производительность средства мониторинга дна равна произведению ширины обследуемой полосы дна на скорость АНПА. Но поскольку скорость АНПА обычно лежит в узких пределах 2-3 уз, то поисковая производительность фактически зависит только от ширины обследуемой полосы дна, которая, в свою очередь, зависит от расстояния от дна, на котором движется АНПА: чем больше это расстояние, тем шире обследуемая полоса. Но с ростом расстояния АНПА от дна уменьшается отношение сигнал/помеха и связанная с ним пространственная разрешающая способность на выходе приёмного тракта. Ввиду этого имеется определённый компромисс между расстоянием АНПА от дна и разрешающей способностью средства мониторинга дна.

В результате, чтобы гарантировать высокую вероятность обнаружения лежащего на дне назначенного донного объекта, нужно использовать ТК, но в этом случае обследование района, в котором предположительно находится объект поиска, может занять недопустимо продолжительное время. И наоборот, чтобы обследовать район за допустимое время, нужно использовать МЛЭ, но в этом случае нельзя гарантировать высокую вероятность обнаружения искомого донного объекта. Из этого напрашивается вывод о целесообразности комплексного использования разных средств мониторинга дна. Но для этого необходимо определить критерий, когда нужно использовать то либо другое средство.

После рассмотрения различных вариантов в качестве такого критерия была выбрана вероятность правильного отнесения обнаруженного донного объекта к объекту поиска. В результате логика поиска назначенного донного объекта выглядит следующим образом. Осуществляется поиск донных объектов средством с максимальной производительностью поиска. При обнаружении донного объекта определяется вероятность его принадлежности объекту поиска. Если она больше заданного высокого порога, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта. Если же она меньше заданного низкого порога, принимается решение, что обнаружен посторонний объект. В противном случае принимается решение о необходимости обследования объекта средством с большей разрешающей способностью.

Проблемным в описанной логике является способ определения вероятности принадлежности обнаруженного объекта объекту поиска по данным каждого средства мониторинга дна. Решение этой проблемы приведено в следующем разделе.

С учётом этой логики алгоритм поиска выглядит следующим образом.

1) По прибытии АНПА в район поиска программный комплекс управления (ПКУ) АНПА даёт команду включить МЛЭ и начать движение АНПА по заданной в маршрутном задании траектории на расстоянии от дна  $H_{МЛЭ}$  и скорости движения, оптимальными при использовании МЛЭ.

2) В процессе движения МЛЭ периодически излучает зондирующие сигналы, принимает и обрабатывает эхосигналы, отражённые от дна. В результате формируется многопиксельное изображение текущего участка дна. Полученное изображение участка дна подаётся на вход обученной нейронной сети, которая вычисляет вероятность того, что на рассматриваемом участке дна находится назначенный объект.

3) Если эта вероятность оказалась меньше заданного в маршрутном задании низкого порогового значения, принимается решение, что назначенный объект на данном участке дна отсутствует и поиск назначенного объекта продолжается.

4) Если же эта вероятность превысила заданный в маршрутном задании высокий порог, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта, определяются его координаты и на этом поиск прекращается.

5) Если же значение вероятности оказалось между низким и высоким порогами, принимается решение о необходимости классификации участка дна средством мониторинга дна с более высокой разрешающей способностью, т.е. ГБО.

6) В этом случае выключается МЛЭ, включается ГБО, АНПА погружается на расстояние от дна  $H_{ГБО}$ , оптимального для использования ГБО, и один либо несколько раз проходит над тем же участком дна. По данным ГБО формируется изображение участка дна. Далее, как и при использовании МЛЭ, осуществляется его классификация с использованием искусственной нейронной сети. В результате классификации определяется вероятность того, что обнаружен назначенный объект.

7) Если эта вероятность оказалась меньше заданного в маршрутном задании низкого порога, принимается решение, что назначенный объект на данном участке дна отсутствует и поиск назначенного объекта продолжается.

8) Если эта вероятность превысила заданный в маршрутном задании высокий порог, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта, определяются его координаты и на этом поиск прекращается.

9) Если значение вероятности оказалось между низким и высоким порогами, принимается решение о необходимости классификации обнаруженного объекта средством мониторинга дна с более высокой разрешающей способностью, т.е. ТК. В этом случае выключается ГБО и включается ТК, АНПА погружается на расстояние от дна, необходимое для классификации объекта с использованием ТК и обходит участок дна по кругу. В процессе обхода формируется изображение участка дна. Далее осуществляется классификация участка дна с использованием искусственной нейронной сети. В результате классификации определяется вероятность того, что обнаружен назначенный объект.

10) Если эта вероятность оказалась меньше заданного в маршрутном задании низкого порога, принимается решение, что объект посторонний и поиск назначенного объекта продолжается с использованием МЛЭ.

11) Если же эта вероятность превысила заданный в маршрутном задании высокий порог, принимается решение об обнаружении назначенного донного объекта, определяются координаты обнаруженного объекта и на этом поиск прекращается.

12) Если же вероятность оказалась между низким и высоким порогами и при этом для классификации объекта были задействованы все средства мониторинга дна, имеющиеся на АНПА, принимается решение об обнаружении неизвестного объекта, при этом изображения объекта, полученные с использованием каждого из средств мониторинга дна, вместе с координатами объекта записываются в архиватор АНПА для уточнения классификации на берегу. Затем поиск назначенного донного объекта продолжается с использованием МЛЭ.

**2. Описание алгоритма классификации обнаруженного донного объекта.** Наиболее перспективной технологией распознавания объектов, развиваемой в настоящее время, является технология глубокого обучения искусственных нейронных сетей (ИНС). Однако для её эффективного применения требуется наличие большого объёма обучающего материала, исчисляемого тысячами и более экземпляров, что для рассматриваемой задачи поиска донных объектов практически не реализуемо.

Ввиду этого была рассмотрена возможность применения других технологий, в частности технологии создания эвристических алгоритмов, описанных во многих публикациях [14, 16, 18]. В результате анализа этих публикаций был сделан вывод, что на сегодняшний день отсутствуют методы, позволяющие распознавать донные объекты с высокой достоверностью, а также оценивать вероятность правильной классификации в каждом конкретном случае. Ввиду этого был сделан вывод, что целесообразно сосредоточиться на приспособлении к рассматриваемой задаче технологии глубокого обучения ИНС. Очевидным направлением этого приспособления является разработка метода синтеза обучающей выборки.

В работе такой метод был разработан [19, 20]. Он заключается в следующем:

1) До начала выполнения миссии на основании маршрутного задания формируется исходное описание объекта поиска, включающее его геометрические размеры, положение на дне, материал корпуса, наличие электромагнитных излучений.

2) Аналогично формируются исходные описания до десяти характерных альтернативных объектов, которые могут быть обнаружены на дне.

3) С использованием исходного описания формируются цифровые 3D модели объекта поиска и альтернативных объектов.

4) Цифровая 3D модель объекта поиска и цифровые модели альтернативных объектов с использованием цифровых двойников средств мониторинга дна [21] преобразуется в цифровые изображения на выходе каждого из средства мониторинга дна. При этом следует заметить, что выходом большинства средств мониторинга дна являются многопиксельные изображения, включающие как сам объект, так и участок дна. Данный процесс повторяется многократно в интересах получения множества изображений распознаваемого объекта с разных ракурсов наблюдения.

5) Для дальнейшего увеличения объёма обучающего материала полученные цифровые изображения объекта поиска и альтернативных объектов подвергаются известной процедуре аугментации, позволяющей изменить масштаб и поворот изображения, а также зашумить его.

6) С использованием, как минимум, нескольких сотен изображений объекта поиска и альтернативных объектов осуществляется обучение предобученной для решения подобных задач выбранной свёрточной ИНС применительно к каждому средству мониторинга дна. Результатом обучения выбранной ИНС являются как настроечные коэффициенты, используемые для распознавания донного объекта соответствующим средством мониторинга дна, так и вероятности правильного отнесения объекта поиска и каждого альтернативного донного объекта к своему классу.

7) Результаты обучения ИНС применительно к каждому средству мониторинга дна записываются в память процессора АНПА.

8) Классификация обнаруженного донного объекта по данным конкретного средства мониторинга дна осуществляется путём подачи на вход ИНС, настроенной применительно к этому средству, изображения объекта на выходе этого средства. На выходе ИНС появляются вероятности принадлежности распознаваемого объекта как объекту поиска, так и каждому альтернативному объекту, что позволяет по формуле Байеса вычислить апостериорную вероятность того, что распознаваемый объект является объектом поиска.

Для проверки работоспособности описанной технологии была промоделирована задача распознавания затонувшего самолёта по данным ГБО. В качестве альтернативных объектов рассматривались трубопровод, небольшое затонувшее судно и мина.

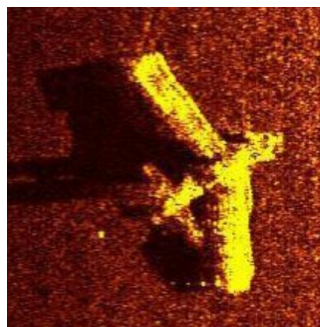
В качестве ИНС с глубоким обучением была выбрана ИНС SqueezeNet [22]. Выбор именно этой сети был обусловлен её возможностью проводить обучение с наименьшими затратами вычислительной мощности. SqueezeNet является свёрточной нейронной сетью, содержащей 18 скрытых слоев (слоёв обучения). Эта нейронная сеть настроена на классификацию изображения 1000 категорий объектов и была проверена на базе данных ImageNet, где показала высокий уровень классификации изображений. Для применения SqueezeNet к рассматриваемой задаче проводилось её обучение с использованием изображений, синтезированных по описанной методике. Для обучения настраивались параметры ИНС (скорость обучения, количество эпох обучения, функция оптимизации обучения и т.д.) таким образом, чтобы ошибка ИНС имела постепенно убывающее значение. Процесс обучения ИНС схематически показан на рис. 2.

В результате описанной процедуры синтеза обучающей выборки было сформировано 1800 изображений (по 450 изображений каждого класса объектов) размером 227x227 пикселей, из которых 1200 изображений (по 300 каждого класса) были обучающими и 600 (по 150 каждого класса) – контрольными.

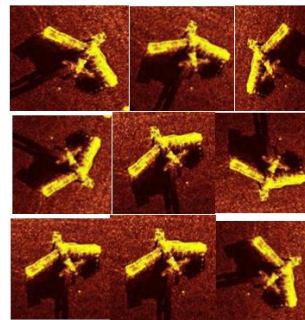
На рис. 3,а в качестве иллюстрации приведено полученное с использованием ГБО изображение лежащего на дне самолёта, скаченное из сети Интернет, а на рис. 3,б – результат его аугментации.



Рис. 2. Схема процесса обучения ИНС



а – Исходное изображение



б – Варианты аугментированных изображений

Рис. 3. Примеры аугментации изображения объекта типа «самолет»

Процесс обучения ИНС представлен на рис. 4, на котором по оси абсцисс отложены номера циклов (эпох) обучения, а по оси ординат: вероятность (в процентах) правильного распознавания. Из рассмотрения рис. 4 следует, что обучение ИНС достаточно быстро сходится к стопроцентной вероятности распознавания на обучающей выборке.

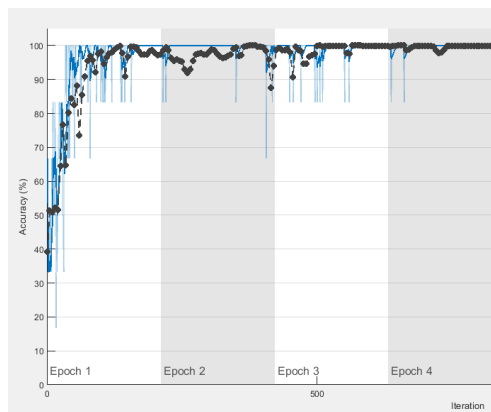


Рис. 4. Процесс обучения ИНС

Проверка обученной ИНС показала следующие результаты:

- ♦ вероятность правильного распознавания объектов типа "самолёт": 94% на обучающей выборке и 86% на контрольной выборке;
- ♦ вероятность ложной тревоги (т.е. отнесение объектов альтернативных классов к классу типа "самолёт"): 9% на обучающей выборке и 17% на контрольной выборке.

**3. Моделирование алгоритма поиска назначенного донного объекта.** Проверка эффективности алгоритма поиска назначенного донного объекта проводилась путём моделирования выполнения миссии АНПА на цифровом полигоне с использованием цифрового двойника АНПА [23]. Структура взаимодействия цифрового полигона (блоки, окрашенные голубым цветом) и цифрового двойника АНПА (блоки, окрашенные жёлтым цветом) изображена на рис. 5.

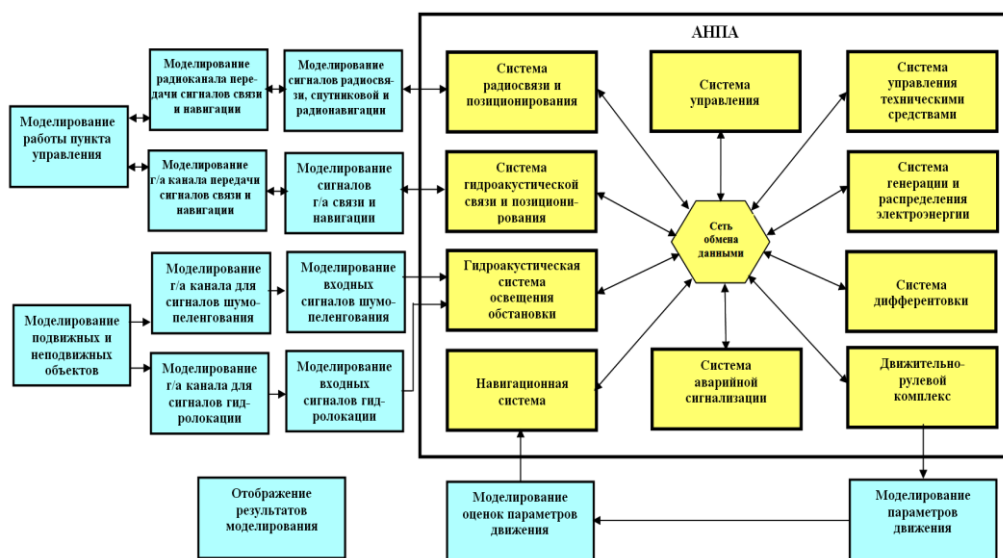


Рис. 5. Структура взаимодействия цифрового полигона и цифрового двойника АНПА при отработке алгоритмов управления АНПА

При отработке задачи поиска донных объектов цифровой полигон имитирует:

- ◆ географические и гидроакустические условия в районе миссии АНПА;
- ◆ структуру дна;
- ◆ различные донные объекты;
- ◆ входные сигналы средств мониторинга дна;
- ◆ входные сигналы навигационных датчиков измерения курса, скорости, глубины АНПА и глубины под килём.

При обработке задачи поиска донных объектов задействованы цифровые двойники следующих систем АНПА:

- ◆ системы управления АНПА, в которой реализован описанный выше алгоритм управления АНПА при поиске донных объектов с классификацией обнаруженных донных объектов с применением нейронной сети архитектуры SqueezeNet;
- ◆ системы управления техническими средствами;
- ◆ навигационной системы;
- ◆ гидроакустической системы освещения обстановки, включающей средства мониторинга дна;
- ◆ системы радиосвязи.

Моделировалась следующая миссия АНПА. Перед АНПА была поставлена задача найти потерпевший крушение легкомоторный самолёт. Район крушения был известен. АНПА должен был прибыть в центр района поиска, погрузиться на заданную глубину и

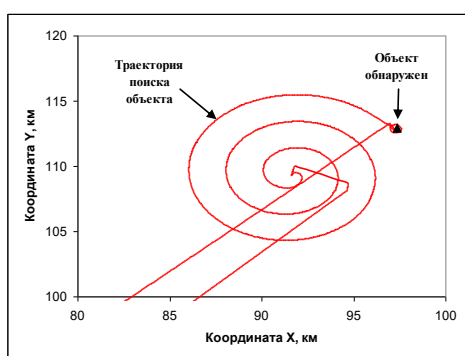


начать движение по раскручивающейся спирали, реализовывая описанный выше алгоритм поиска. При обнаружении самолёта АНПА должен всплыть, определить точные координаты места крушения и по радиоканалу сообщить их на пункт управления.

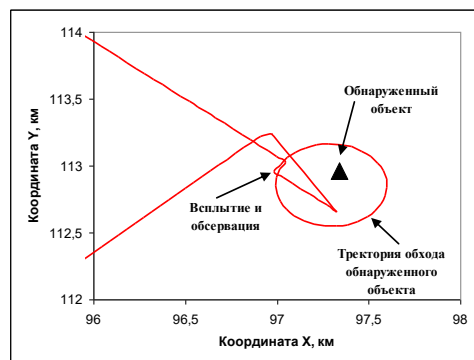
Учитывая, что объект поиска является достаточно крупногабаритным, для поиска применяются МЛЭ и ГБО. Применять ТК нет необходимости. Поиск начинается с использованием МЛЭ. При обнаружении донного объекта осуществляется его классификация с определением вероятности принадлежности объекта классу самолёт. В зависимости от этой вероятности согласно описанному выше алгоритму принимается одно из трёх решений: считать самолёт обнаруженным и прекратить поиск; считать объект посторонним и продолжить поиск; уточнить классификацию с использованием ГБО. Если в течение 48 часов объект поиска не обнаружен, миссия считается неуспешной. В противном случае миссия признаётся успешной и определяется время обнаружения объекта с момента начала поиска.

Моделирование поиска повторялось 1000 раз. По результатам всех повторов определялся процент успешных миссий и среднее время обнаружения объекта поиска для успешных миссий.

На рис. 6 в качестве иллюстрации приведено маневрирование АНПА при поиске назначенного донного объекта. Рис. 6,а демонстрирует движение АНПА по раскручивающейся спирали при поиске донного объекта с использованием МЛЭ. На рис. 6,б изображён манёвр обхода объекта для уточнения классификации.



а – процесс поиска донного объекта



б – обход обнаруженного объекта для уточнения его классификации

Рис. 6. Иллюстрация маневрирования АНПА в процессе поиска назначенного донного объекта в форме штурманской прокладки, выполняемой системой навигации АНПА

Для сравнения по описанной методике моделировались 3 типа миссий в зависимости от использованных средств мониторинга дна: 1) МЛЭ и ГБО; 2) только МЛЭ и 3) только ГБО.

Результаты моделирования приведены в табл. 1.

| Используемые средства мониторинга дна | Процент успешных миссий | Среднее время обнаружения объекта поиска, час |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------|
| МЛЭ и ГБО                             | 97                      | 31,7                                          |
| Только МЛЭ                            | 84                      | 27,2                                          |
| Только ГБО                            | 71                      | 44,3                                          |

Из рассмотрения табл. 1 следует, что поиск назначенного донного объекта при использовании МЛЭ и ГБО выигрывает по проценту успешных миссий. Поиск с использованием только МЛЭ позволяет ускорить обнаружение объекта поиска, но приводит к существенному сокращению количества успешных миссий. При использовании только ГБО АНПА в 29% случаев не успевает в течение 48 часов обнаружить искомый объект. При этом возрастает и среднее время его обнаружения в миссиях, когда объект найти удалось.

**Заключение.** В статье излагается алгоритм применения АНПА для поиска назначенного донного объекта с использованием комплекса средств мониторинга дна, отличающихся разрешающей способностью и поисковой производительностью. Описана технология классификации донных объектов на основе обучения искусственной нейронной сети с использованием синтезированного обучающего материала. Приведена технология отработки разработанного алгоритма с использованием цифрового полигона и цифрового двойника АНПА. Выполненное моделирование разработанного алгоритма показало, что комплексное использование средств мониторинга дна повышает вероятность успешного решения задачи и сокращает время её решения.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №25-29-01261).*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фирсов Ю.Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 348 с.
2. *Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В.* Управление движением и динамика гибридного подводного аппарата при патрулировании морских акваторий по эквидистантным траекториям в сложном рельефе дна // Подводные исследования и робототехника. – 2021. – № 3 (37). – С. 46-56.
3. *Мартынова Л.А.* Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 1 (86). – С. 83-92.
4. *Shaukat M.S., K. Yannik, Bader S., Kirste T.* Towards Training-Free Underwater 3D Object Detection from Sonar Point Clouds: A Comparison of Traditional and Deep Learning Approaches // arXiv preprint arXiv:2508.18293v1 [cs.CV]. 2025. 22 Aug. – URL: <https://arxiv.org/abs/2508.18293> (дата обращения: 25.02.2026).
5. *Williams D.P.* The Mondrian Detection Algorithm for Sonar Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 56, No. 2. – P. 1091-1102. – DOI: 10.1109/TGRS.2017.2758808.
6. *Gerg I.D., Williams D.P.* Additional Representations for Improving Synthetic Aperture Sonar Classification Using Convolutional Neural Networks // arXiv preprint arXiv:1808.02868. – 2018. – DOI: 10.48550/arXiv.1808.02868.
7. *Римский-Корсаков Н.А.* Определение координат подводных природных объектов методом гидролокации бокового обзора // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 12-1. – С. 148-153.
8. *Безрук Г.Г., Мартынова Л.А., Саенко И.Б.* Динамический метод поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Тр. СПИИРАН. – 2018. – Вып. 3 (58). – С. 203-226.
9. *Киселев Л.В., Медведев А.В.* Траекторное обследование границ морских акваторий группой автономных необитаемых подводных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5 (247). – С. 185-197.
10. *Артюхин В.В., Вялишев А.И., Добров В.М., Любин Ю.Н.* Метод автоматической классификации подводных потенциально опасных объектов // Технологии гражданской безопасности. – 2019. – Т. 16, № 1 (59). – С. 12-19.
11. *Тарасов С.П., Воскресенский А.В., Пивнев П.П., Воронин В.А.* Возможности нелинейной гидроакустики в вопросах поиска малоразмерных объектов средствами робототехники // Матер. XVI Всероссийской научно-практической конференции и XII молодежной школы-семинара. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 81-85.
12. *Nambiar K.V.A., George A., Mathew A., Sreehari R., Deepak S.* Object Detection and Classification from Sonar Underwater Images Using YOLO and DETR Models // 2025 International Conference on Advanced Processing and Computational Intelligence (APCI). – 2025. – DOI: 10.1109/APCI65531.2025.11136948.
13. *Qiao J., Yu J., Huang Y., Feng H., Jia D., Wang Z., Wang B.* AUVs for Seabed Surveying: A Comprehensive Review of Side-Scan Sonar-Based Target Detection // Journal of Marine Science and Engineering. – 2026. – Vol. 14, No. 2.
14. *Бахмутов В.Ю., Жуков Ю.Н.* Автоматизированный метод обнаружения объектов на морском дне по данным многолучевых гидролокаторов // Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 58-66.
15. *Phung A., Billings G., Camilli R.* Sonar-Aided Manipulation in Low-Visibility Conditions by Novice Users // OCEANS 2024 – Halifax: Conference Proceedings. – IEEE, 2024. – DOI: 10.1109/OCEANS55160.2024.10753694.

16. Боровик А.И. Технология использования АНПА для исследования подводных потенциально опасных объектов в Карском море // Подводные исследования и робототехника. – 2022. – № 1 (39). – С. 32-40. – DOI: 10.37102/1992-4429.2022.39.1.03.
17. Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Степанов А.В. Оценка сходимости глубин при площадной съемке рельефа дна многолучевым эхолотом и интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – ISSN 1684-1719.
18. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / отв. ред. Л.В. Киселев. – Владивосток: Дальнаука, 2018. – 368 с.
19. Патент РФ № 2818184 с приоритетом от 03.11.2022 по заявке № 2022128572. Способ распознавания назначенного донного объекта / Быкова В.С., Машошин А.И., Смирнов А.С. Опубл. 25.04.24, бюлл. № 12.
20. 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 // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022, Sochi. – <https://ieeexplore.ieee.org/document/9896324>.
21. Павлов А.А., Быкова В.С. Имитационная модель средств обследования дна с использованием средств OpenGL // Тр. седьмой международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023). – СПб., 2023. – С. 169-175.
22. Iandola F.N., Han S., Moskewicz M.W., Ashraf K., Dally W.J., Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level Accuracy with 50x Fewer Parameters and <0.5 MB Model Size // arXiv preprint arXiv:1602.07360. – 2016.
23. Быкова В.С., Машошин А.И. Цифровой полигон для отработки системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Морская радиоэлектроника. – 2023. – № 2 (84). – С. 58-64.

#### REFERENCES

1. Firsov Yu.G. Osnovy gidroakustiki i ispol'zovaniya gidrograficheskikh sonarov [Fundamentals of hydroacoustics and the use of hydrographic sonars]. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, 2010, 348 p.
2. Kiselev L.V., Kostenko V.V., Medvedev A.V. Upravlenie dvizheniem i dinamika gibridnogo podvodnogo apparata pri patrulirovanii morskikh akvatoriy po ekvidistantnym traektoriyam v slozhnom rel'efe dna [Motion control and dynamics of a hybrid underwater vehicle during patrol of marine areas along equidistant trajectories in complex bottom relief], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2021, No. 3 (37), pp. 46-56.
3. Martynova L.A. Metod soglasovannogo povedeniya izluchatelya i avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya effektivnogo vedeniya seysmorazvedki [Method of coordinated behavior of the emitter and autonomous unmanned underwater vehicles for efficient seismic exploration], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, No. 1 (86), pp. 83-92.
4. Shaikat M.S., Yannik, Bader S., Kirste T. Towards Training-Free Underwater 3D Object Detection from Sonar Point Clouds: A Comparison of Traditional and Deep Learning Approaches, *arXiv preprint arXiv:2508.18293v1 [cs.CV]*. 2025. 22 Aug. Available at: <https://arxiv.org/abs/2508.18293> (accessed 25 February 2026).
5. Williams D.P. The Mondrian Detection Algorithm for Sonar Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, Vol. 56, No. 2, pp. 1091-1102. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2758808.
6. Gerg I.D., Williams D.P. Additional Representations for Improving Synthetic Aperture Sonar Classification Using Convolutional Neural Networks, *arXiv preprint arXiv:1808.02868*, 2018. DOI: 10.48550/arXiv.1808.02868.
7. Rimskiy-Korsakov N.A. Opredelenie koordinat podvodnykh prirodnykh ob"ektov metodom gidrolokatsii bokovogo obzora [Determination of coordinates of underwater natural objects by side-scan sonar method], *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2017, No. 12-1, pp. 148-153.
8. Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B. Dinamicheskii metod poiska antropogennykh ob"ektov v morskome dne s ispol'zovaniem avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Dynamic method for searching anthropogenic objects in the seabed using autonomous unmanned underwater vehicles], *Tr. SPIIRAN* [Proceedings of SPIIRAS], 2018, Issue 3 (58), pp. 203-226.
9. Kiselev L.V., Medvedev A.V. Traektornoe obsledovanie granits morskikh akvatoriy gruppoy avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh robotov [Trajectory survey of marine area boundaries by a group of autonomous unmanned underwater robots], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 5 (247), pp. 185-197.
10. Artyukhin V.V., Vyalyshev A.I., Dobrov V.M., Lyubin Yu.N. Metod avtomaticheskoy klassifikatsii podvodnykh potentsial'no opasnykh ob"ektov [Method of automatic classification of underwater potentially hazardous objects], *Tekhnologii grazhdanskoй bezopasnosti* [Civil Security Technologies], 2019, Vol. 16, No. 1 (59), pp. 12-19.

11. Tarasov S.P., Voskresenskiy A.V., Pivnev P.P., Voronin V.A. Vozmozhnosti nelineynoy gidroakustiki v voprosakh poiska malorazmernykh ob"ektov sredstvami robototekhniki [Capabilities of nonlinear hydroacoustics in the search for small-sized objects using robotics], *Mater. XVI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i XII molodezhnoy shkoly-seminara* [Proceedings of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference and XII Youth School-Seminar]. Rostov-on-Don, 2021, pp. 81-85.
12. Nambiar K.V.A., George A., Mathew A., Sreehari R., Deepak S. Object Detection and Classification from Sonar Underwater Images Using YOLO and DETR Models, *2025 International Conference on Advanced Processing and Computational Intelligence (APCI)*, 2025. DOI: 10.1109/APCI65531.2025.11136948.
13. Qiao J., Yu J., Huang Y., Feng H., Jia D., Wang Z., Wang B. AUVs for Seabed Surveying: A Comprehensive Review of Side-Scan Sonar-Based Target Detection, *Journal of Marine Science and Engineering*, 2026, Vol. 14, No. 2.
14. Bakhmutov V.Yu., Zhukov Yu.N. Avtomatizirovanny metod obnaruzheniya ob"ektov na morskoy dne po dannym mnogoluchevykh gidrolokatorov [Automated method for detecting objects on the seabed based on multibeam sonar data], *Navigatsiya i gidrografiya* [Navigation and Hydrography], 2019, No. 57, pp. 58-66.
15. Phung A., Billings G., Camilli R. Sonar-Aided Manipulation in Low-Visibility Conditions by Novice Users, *OCEANS 2024 – Halifax: Conference Proceedings*. IEEE, 2024. DOI: 10.1109/OCEANS55160.2024.10753694.
16. Borovik A.I. Tekhnologiya ispol'zovaniya ANPA dlya issledovaniya podvodnykh potentsial'no opasnykh ob"ektov v Karskom more [Technology of using AUVs for research of underwater potentially hazardous objects in the Kara sea], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2022, No. 1 (39), pp. 32-40. DOI: 10.37102/1992-4429.2022.39.1.03.
17. Krivtsov A.P., Smol'yaninov I.V., Elbakidze A.V., Stepanov A.V. Otsenka skhodimosti glubin pri ploshchadnoy s"emke rel'efa dna mnogoluchevym ekholotom i interferometricheskimi gidrolokatorami bokovogo obzora [Estimation of depth convergence during area survey of bottom relief using multibeam echosounder and interferometric side-scan sonar], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2017, No. 4. ISSN 1684-1719.
18. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. Podvodnye robototekhnicheskie komplekсы: sistemy, tekhnologii, primeneniye [Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications], ed. by L.V. Kiselev. Vladivostok: Dal'nauka, 2018, 368 p.
19. Bykova V.S., Mashoshin A.I., Smirnov A.S. Patent RF № 2818184 s prioriteto ot 03.11.2022 po zayavke № 2022128572. Sposob raspoznavaniya naznachennogo donnogo ob"ekta [Russian Federation Patent No. 2818184 with priority dated 03.11.2022 for application No. 2022128572. Method for recognizing a designated bottom object]; published April 25 2024; bull. No. 12.
20. 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, *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2022, Sochi. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9896324>.
21. Pavlov A.A., Bykova V.S. Imitatsionnaya model' sredstv obsledovaniya dna s ispol'zovaniem sredstv OpenGL [Simulation model of seabed survey tools using OpenGL] *Tr. sed'moy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoy tekhniki i morskikh transportnykh sistem» (IKM MTMTS-2023)* [Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference "Imitative and Complex Modeling of Marine Equipment and Marine Transport Systems" (ICM MMTS-2023)]. St. Petersburg, 2023, pp. 169-175.
22. Iandola F.N., Han S., Moskewicz M.W., Ashraf K., Dally W.J., Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level Accuracy with 50x Fewer Parameters and <0.5 MB Model Size, *arXiv preprint arXiv:1602.07360*, 2016.
23. Bykova V.S., Mashoshin A.I. Tsifrovoy poligon dlya otrabotki sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Digital proving ground for testing the control system of an autonomous unmanned underwater vehicle], *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio Electronics], 2023, No. 2 (84), pp. 58-64.

**Быкова Валентина Сергеевна** – АО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор"; e-mail: vs.bykova@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79213502293.

**Машошин Андрей Иванович** – АО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор"; e-mail: aimashoshin@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79217632345; д.т.н.; профессор.

**Bykova Valentina Sergeevna** – JSC «Concern «Elektropribor»; e-mail: zvs2011@yandex.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79213502293.

**Mashoshin Andrey Ivanovich** – JSC «Concern «Elektropribor»; e-mail: aimashoshin@mail.ru; Saint Petersburg, Russia; phone: +79217632345; dr. of eng. sc.; professor.