

О НЕКОТОРЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГИБРИДНЫХ МОРСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

А.Ф. Щербатюк

В статье рассмотрены некоторые современные технологические направления развития морских беспилотных гибридных аппаратов, в состав которых входят подводные, а также надводные или летательные аппараты. Основными целями таких работ наряду с решением новых задач являются повышение надежности и безопасности выполнения актуальных работ путем исключения присутствия человека в районе их проведения, а также снижение стоимости морских робототехнических комплексов и уменьшение расходов на эксплуатацию в первую очередь за счет отказа от использования дорогостоящего судового обеспечения.

Ключевые слова: морские гибридные аппараты, автономные необитаемые подводные аппараты, телеуправляемые необитаемые подводные аппараты, безэкипажные катера, беспилотные летательные аппараты.

1. Введение

В настоящее время морские робототехнические комплексы (МРК) являются важными инструментами, с помощью которых человек может исследовать и использовать ресурсы океана. Такие МРК могут включать автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), автономные необитаемые водные аппараты – безэкипажные катера (АНБА-БЭК), а также беспилотные летательные аппараты (БПЛА). В большинстве случаев МРК представляют собой специализированные платформы, на которых установлено различное исследовательское оборудование или рабочие инструменты для решения широкого круга задач. Разные по составу МРК обеспечивают эффективное выполнение работ в условиях, в которых опасно или невозможно пребывание человека.

В современных условиях основные направления развития МРК связаны с разработкой новых подходов и конструктивных принципов их построения для решения новых задач, повышения надежности выполнения актуальных работ, а также снижения стоимости МРК, особенно при использовании групп однотипных аппаратов, и уменьшения расходов на эксплуатацию в первую очередь за счет отказа от использования дорогостоящего судового обеспечения.

Работы по созданию МРК и инфраструктуры для их эффективного использования интенсивно ведутся за рубежом в ряде мировых центров подводной робототехники (MBARI, MIT, WHOI (все США), IFREMER (Франция), ATLAS (Германия) и др.). Один из европейских проектов MORPH [1] посвящен отработке совместных операций с использованием группы АНБА и АНПА. В рамках проекта были проведены испытания, в которых приняли участие девять организаций из пяти стран (Германии, Португалии, Италии, Франции и Испании). Проводились эксперименты, в которых вместе с АНБА одновременно работали до пяти разнородных АНПА.

Финансируемый Европейским союзом в рамках программы Horizon 2020 проект ATLANTIS [2] направлен на создание передовой экспериментальной инфраструктуры, которая позволит продемонстрировать ключевые роботизированные технологии для инспектирования и технического обслуживания морских ветряных электростанций. Традиционные процедуры предполагают участие человека в операциях, которые опасны и требуют огромного объема ресурсов, что приводит к значительным денежным затратам. Для решения этих проблем предлагается использование робототехнических технологий с применением беспилотных летательных аппаратов, безэкипажных катеров и подводных аппаратов.

Проект OceanLab, выполняемый лабораторией прикладной подводной робототехники NTNU (AURLab) при поддержке программы Horizon 2020, предназначен для разработки полномасштабного комплекса для подводных испытаний в фьорде Тронхейм (Норвегия). В докладе [3] описывается разрабатываемая в рамках OceanLab инфраструктура и подводное оборудование, а также способы удаленного доступа к инфраструктуре. Кратко описаны различные варианты использования, такие как стыковка, дистанционное экспериментирование, а также тестирование беспилотных аппаратов для выполнения широкого круга подводных работ.

Другой европейский проект DIIUS [4] направлен на развитие способов комплексного использования разнородных данных для роботизированных комплексов с помощью методологий объединения информации. Распределенные возможности восприятия, основанные на использовании нескольких роботизированных систем, могут обеспечить значительное преимущество в сравнении с традиционными решениями. Совместная работа нескольких интеллектуальных роботизированных систем является более эффективным способом выполнения задач в крупномасштабных сценариях, таких как обслуживание морских портов или группы ветряных электростанций. Это приводит к повышению достоверности данных путем многократного наблюдения за характеристиками окружающей среды. С научной точки зрения проект DIIUS фокусируется на двух задачах: корреляции информации от разнородных сенсорных систем и объединении распределенных в пространстве и времени множества 3D-карт, в частности, за счет применения методов машинного обучения для извлечения интерактивных объектов и проведения надежной пространственно-временной корреляции между отдельными наблюдениями.

В докладе [5] рассмотрены работы по усовершенствованию технологий эксплуатации и технического обслуживания объектов морской ветроэнергетики посредством создания программной инфраструктуры берегового центра управления (SCC), способной осуществлять мониторинг, локализацию и планирование задач для группы многодоменных (действующих в разных средах) разнородных роботов в рамках единой локальной сети. В этой работе SCC решаются задачи: (1) активного монитора, постоянно наблюдающего за поведением каждого робота на месте, а также за глобальным ходом выполнения миссии и ее безопасностью; (2) планирования миссии и контроля ее выполнения посредством постоянной проверки на наличие критических сбоев и коррекции миссии в

случае непредвиденных событий. Центр управления обеспечивает подключение к отдельным аппаратам и отслеживает данные в режиме реального времени. Приводятся некоторые результаты проверок, выполненных в реальных условиях.

В последнее время значительное развитие получило направление, связанное с созданием гибридных аппаратов на основе БПЛА, БЭК, ТНПА и АНПА с целью повышения общей эффективности выполнения работ в океане. В данной статье рассмотрены некоторые современные направления развития и применения гибридных морских беспилотных комплексов. В части 2 обсуждаются робототехнические системы, в которых носителями подводных аппаратов являются безэкипажные катера, приведены примеры таких комплексов и некоторые области их применения. Морские робототехнические системы, в которых для доставки подводных аппаратов к месту работы и обеспечения их работы применяются беспилотные летательные аппараты, рассмотрены в части 3. Гибридные воздушно-подводные аппараты, которые могут действовать как в воздухе, так и под водой и решать прикладные задачи в воздушном и подводном пространстве в составе единого аппарата обсуждаются в части 4. Некоторые заключительные обобщения о развитии гибридных многодоменных аппаратов приведены в части 5.

1. МРК на основе БЭК

При выполнении морских работ с использованием робототехнических систем важнейшими требованиями являются обеспечение высокой мобильности и экономической эффективности морского робототехнического комплекса в целом.

Работы по созданию комплексов на основе БЭК проводятся в ведущих организациях соответствующего профиля. Компания Thales совместно с промышленными партнерами участвует в инновационной исследовательской программе Лаборатории оборонных научно-технических технологий Великобритании под названием MAPLE (Maritime Autonomous Platform Exploitation) [6]. Программа MAPLE разрабатывает будущую архитектуру управления беспилотными системами, позволяя управлять несколькими беспилотными платформами, такими как беспилотные летательные аппараты, беспилотные надводные аппараты и беспилотные подводные аппараты, а также их полезной нагрузкой с единой станции управления. На рис. 1 изображен автономный безэкипажный комплекс от компании Thales, включающий ТНПА и БЭК, созданный



Рис. 1. Комплекс ТНПА и БЭК от компании Thales

и проходящий испытания в рамках указанной программы.

Британская компания Beam, поставщик услуг для компаний офшорной ветроэнергетики, нарастила свой безэкипажный флот двумя БЭК типа Xplorer оснащенными ТНПА рабочего класса Quantum EV. Новые средства будут играть важную роль в услугах компании по обследованию, эксплуатации, техобслуживанию и выводу из эксплуатации морских объектов. Они полностью автономны, могут использовать различные модели ИИ для сбора данных, а также передавать потоки данных на берег для более глубокой обработки. Автономное развертывание ТНПА с БЭК – перспективное направление развития, и Beam планирует получить достаточный опыт к моменту, когда законодательство Великобритании позволит переходить к коммерческому внедрению таких технологий [7].

Одной из актуальных задач, которая решается с помощью комплекса ТНПА и БЭК без использования судов, связана с обследованием подводных трубопроводов. В настоящее время в мире эксплуатируются многочисленные подводные трубопроводные объекты, предназначенные для транспортировки углеводородов и существуют строгие международные стандарты на их эксплуатацию, предусматривающие регулярное обследование трубопроводов. Задачами по обследованию подводного трубопровода являются определение его пространственного положения, обнаружение участков провисов и определение их размеров (длина и величина), определение смещения подводного трубопровода, фиксация любых внешних воздействий по трассе (следов от постановки якорей, использования орудий рыболовства и т.д.), выявление посторонних предметов в непосредственной близости, которые могут повредить трубопро-

вод. Серьезной угрозой при эксплуатации подводных трубопроводов является коррозия. Стандартным методом предотвращения коррозии являются защитные покрытия, дополнительной мерой к этому методу является катодная защита трубопроводов.

Площадное обследование рельефа дна вдоль створа трубопровода выполняется с помощью многолучевого эхолота для определения пространственных координат трубопровода и рельефа дна. Одновременно с площадным обследованием дна выполняют гидролокационное обследование дна и подводных объектов с помощью профилографа. Профилирование выполняют для поиска и обнаружения подводного трубопровода, заглубленного в морское дно, с целью получения информации о глубине его залегания. Одним из методов проверки системы катодной защиты на трубопроводе является размещение станций, оснащенных электродами сравнения, которые постоянно прикреплены к трубе. При этом физический доступ к электроду обеспечивается и в случае, когда трубопровод заглублен под слоем донного грунта.

При обследовании трубопровода с помощью комплекса ТНПА и БЭК подводный аппарат перемещается над трубопроводом, собирая необходимые данные и передавая их в центр управления. Несмотря на то что использование ТНПА является приемлемым вариантом для решения указанной задачи, для его управления потребуются удаленные операторы, что приводит к дополнительным затратам и ограничениям.

Комплекс БЭК и АНПА является перспективной альтернативой, позволяющей осуществлять обследование трубопроводов и кабельных линий (рис. 2). В [8–10] рассмотрены несколько вариантов организации обследования подводных протяженных объектов с помощью АНПА. Один из методов измерения катодной защиты трубопроводов с помощью АНПА описан в [11]. В нем испытательная станция, непосредственно подключенная к трубопроводу, передает данные о состоянии катодной защиты с помощью беспроводной акустической связи, которые собираются АНПА, перемещающегося над трубопроводом. В описании метода рассмотрены вопросы включения питания испытательной станции, передачи сообщений на АНПА, а также навигационные требования для следования подводного аппарата над трубопроводом.

В [12] сообщается о том, что компания British Petroleum поставила цель к 2025 году сделать беспилотные методы основными при инспектировании подводных объектов. В указанной статье приведена информация о проекте, предназначенном для реализации этой цели, в рамках которого в 2019 году об-

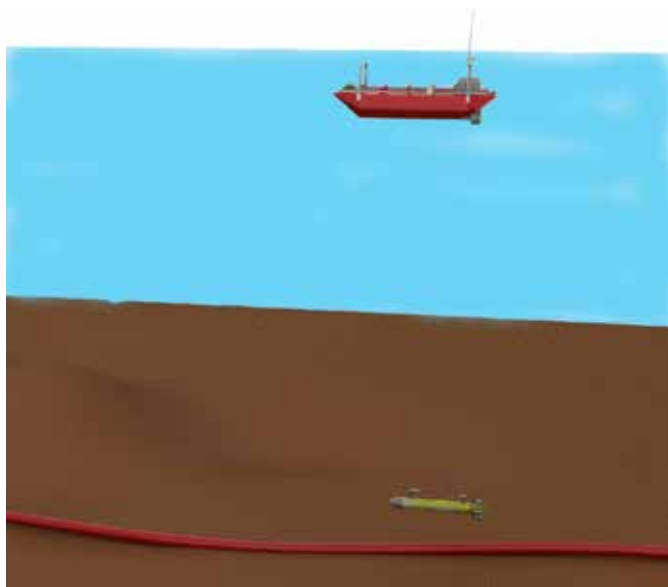


Рис. 2. АНПА перемещается над расположенным на морском дне трубопроводом и сопровождается обеспечивающим БЭК



а



б

Рис. 3. Эпизоды испытаний морского автономного робототехнического комплекса, включающего АНПА и АНВА (а – аппараты в процессе совместной работы, б – АНВА доставляет АНПА к месту работы)

следование подводного трубопровода было выполнено с помощью автономного комплекса, включающего БЭК Sea-Kit Maxlimer и АНПА HUGIN. В процессе выполнения миссии БЭК транспортировал АНПА к объекту и обратно, выполнял функции ретранслятора, обеспечивая акустическую связь под водой и радиосвязь в воздухе. В результате данные передавались в центр управления, обеспечивая коррекцию миссии, что позволяло вносить изменения в задание в режиме реального времени. Кроме того, БЭК обеспечивал постоянное обновление местоположения АНПА с помощью акустической системы позиционирования USBL.

Одним из МРК, который разрабатывался в том числе и для обследования протяженных объектов, является морской автономный робототехнический комплекс, в состав которого входят автономные необитаемые подводный и водный аппараты (АНПА и АНВА) (рис. 3, а, б). Для комплекса созданы системы программного управления и навигации, которые обеспечивают их совместную работу. В статье [13] приведены основные системы, входящие в состав комплекса, а также приведены некоторые результаты морских испытаний. Способ организации мобильной навигации для указанного комплекса на основе ГАНС с синтезированной длинной базой представлен в [14]. Основная идея его состоит в использовании единственного мобильного навигационного маяка, установленного на АНВА. Работа указанной навигационной системы основана на применении модемной гидроакустической связи, которая позволяет синхронно обмениваться пакетами навигационных данных между АНПА и АНВА и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними.

В докладе [15] описана беспилотная система, разработанная для береговой охраны Кореи (КСГ), предназначенная для быстрого подводного расследования в случае аварий на море в сложных морских условиях. Система состоит из четырех малогабаритных АНПА, оснащенных гидролокаторами бокового обзора (ГБО), безэкипажного катера, носителя среднего АНПА с гидролокатором с синтезированной апертурой и роботизированного буя. Для данного комплекса разработана интегрированная система управления и модуль постобработки данных датчиков для мониторинга в режиме реального времени или передачи данных с помощью подводных акустических модемов и радиочастотного оборудования.

При возникновении морской аварии в удаленном морском районе весь комплекс загружается в вертолет и доставляется на судно КСГ в районе аварии.

Несколько AUV разворачиваются один за другим и сканируют назначенные районы с помощью ГБО дальнего действия. Во время обследования АНПА используют алгоритмы машинного обучения для обнаружения и идентификации целей в режиме реального времени. При обнаружении важной цели информация о ней передается на корабль-носитель. В случае необходимости системные операторы задействуют БЭК с АНПА, оснащенный гидролокатором с синтезированной апертурой и видеосистемой.

Следует отметить, что создание комплексов, в которых БЭК является носителем ТНПА или АНПА, наделенных элементами искусственного интеллекта, для выполнения различных подводно-технических работ, в настоящее время выходит на коммерческий уровень. Возможность автономной эксплуатации комплекса указанных аппаратов без непосредственного присутствия человека в районе работ позволяет отказаться от использования судов и существенно снижает стоимость выполнения морских работ. Основными областями использования таких комплексов являются картографирование дна, поиск затонувших объектов, обследование протяженных объектов (подводных трубопроводов и кабелей), экологический мониторинг, оценка запасов биоресурсов.

3. МРК с использованием БПЛА

Многие современные операции в море предусматривают совместные наблюдения как в толще воды, так и с воздуха. Эти миссии предназначены в том числе для изучения океанских явлений с высокой пространственной и временной изменчивостью в воздушной и морской среде. Подобные операции включают мониторинг чрезвычайных ситуаций в океане, таких как красные приливы или разливы нефти. При этом обнаружение их с воздуха сопровождается отбором проб воды в этом районе в режиме реального времени, что позволяет анализировать и прогнозировать развитие этих событий.

Воздушные дроны наряду с наблюдением также позволяют обеспечить эффективную связь с удаленным постом управления. В ИПМТ ДВО РАН в 2019 году был проведен эксперимент по проверке увеличения дальности связи между находящимся на поверхности моря АНПА ММТ 300 и поднятым на 100 метров над поверхностью малогабаритным квадрокоптером с оборудованием ретрансляции малой мощности. В результате получена устойчивая связь с абонентом на дальности 8 км.

Традиционные и широко используемые методы подводных инспекций часто сопряжены с проблемами, связанными со временем, энергией, денежными затратами и человеческими рисками, когда работникам приходится использовать лодки, чтобы добраться до морских платформ и совершить несколько погружений для проведения инспекций. Sea-Air Integrated Drone (рис. 4), представляет собой единый аппарат, имеющий в своем составе мощный воздушный беспилотник от компании KDDI и ТНПА промышленного класса FIFISH PRO V6 PLUS от QYSEA. Sea-Air Integrated Drone предназначен для удаленной оперативной работы на море посредством посадки на поверхность моря в заданном районе и спуска ТНПА с помощью закрепленной на борту аппарата лебедки [16].

Оператор на суше может проводить инспекции с визуальной обратной связью в режиме реального времени и управлять работой в подводных условиях с помощью различных инструментов для отбора проб, измерений и манипулятора, а также вести прямую трансляцию операций для совместной работы нескольких человек. Sea-Air Integrated Drone можно использовать, например, для осмотра подводной части прибрежной ветряной электростанции или проверки состояния корпуса плавающего средства. Другие потенциальные области применения могут быть связаны с обеспечением прибрежных морских операций, связанных с марикультурой, а также оценкой запасов донных гидробионтов.

Вариант исполнения и использования воздушного беспилотника от компании KDDI и ТНПА, собранного с использованием деталей компании Blue Robotics, описан в [17]. Для определения местоположения подводного дрона применяется гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой (SSBL), в которой пингер установлен на ТНПА, а приемная антенна – на воздушном дроне [18].



Рис. 4. Беспилотный летательный аппарат Sea-Air Integrated Drone опускается на воду перед запуском ТНПА FIFISH

В статье [19] представлены первые испытания полезной нагрузки новой концепции беспилотной системы под названием Seahawk F4 от канадской компании Seahawk Robotics Inc. Указанный дрон квадрокоптерного типа способен летать и плавать по морской поверхности. Он предназначен для доставки полезной нагрузки весом до 9 кг в указанный район работ и обеспечения выполнения задания. Модульная конструкция аппарата позволяет изменять его конфигурацию для широкого спектра применений. В число доступных датчиков входят эхолот для измерения глубины моря и многопараметрический датчик параметров воды для измерения температуры, электропроводности и pH. Аппарат также может использовать лебедочный механизм для установки на заданную глубину датчиков профилирования или компактного ТНПА. В статье рассматриваются технические детали установки и тестирования такого лебедочного механизма для акустического мониторинга.

Важно подчеркнуть, что создание аппаратов, включающих БПЛА и ТНПА или другую полезную нагрузку, которая с помощью лебедки опускается в указанном месте на заданную глубину, в настоящее время находится на стадии промышленной разработки и практических испытаний в реальных морских условиях. Такие аппараты являются эффективной альтернативой для оперативного выполнения поисковых или инспекционных работ в труднодоступных районах, а также местах расположения сложных подводных сооружений.

4. Гибридные воздушно-подводные аппараты

При эксплуатации БПЛА вблизи поверхности моря в реальных условиях из-за порывов ветра и волнения велика вероятность падения дронов в воду, что приводит к потере аппаратов. БПЛА морского исполнения целесообразно наделить способностью всплывать и взлетать с поверхности моря. Для обеспечения более эффективного решения задач, связанных с использованием АНПА и БПЛА, в последние годы значительное развитие получила новая концепция – гибридные воздушно-подводные аппараты (ГВПА) (hybrid aerial underwater vehicles (HAUV)). ГВПА представляют собой мобильные объекты, которые могут действовать как в воздухе, так и под водой и решать прикладные задачи в воздушном и подводном пространстве в составе единого аппарата.

Такие аппараты могут быть применены для экстренного поиска и спасения на море, используя

свои возможности быстрого передвижения, чтобы оперативно добраться до места аварии и проводить воздушные и подводные поисково-спасательные работы в соответствующих районах. Также они могут использоваться для морского патрулирования, обнаружения целей, слежения за ними и т.д. Кроме того, ГВПА могут применяться для выполнения некоторых скрытных задач, используя свои уникальные возможности передвижения под водой. Они также могут выполнять задачи передачи сигналов и использоваться в качестве мобильной ретрансляционной станции для взаимодействия между подводными и надводными базовыми станциями и спутниками благодаря свободному перемещению из подводного положения в воздушную среду.

Для функционирования в двух средах, плотности которых различаются почти на три порядка, требуется конструкция и система управления, которые позволят аппарату эффективно перемещаться в воздухе и под водой. Кроме того, он должен быть легким и в то же время иметь прочный корпус. В современных публикациях прослеживаются два направления при проектировании ГВПА – на основе концепций проектирования беспилотных летательных и подводных аппаратов, кроме того, развивается подход по созданию аппаратов с биоинспирированным дизайном [20, 21].

Биоинспирированные аппараты копируют принципы, заложенные в природных существах, которые могут передвигаться как в воздухе, так и под водой. В качестве образцов используются водоплавающие птицы, летучие рыбы и различные насекомые. Как один из примеров можно указать микроробот, выполненный в виде насекомого миллиметрового размера, который описан в [22]. Этот микроробот с машущими крыльями оснащен воздушными и водными пропеллерами для выполнения зависания, перехода из воздуха в воду, плавания, взлета и посадки на водной поверхности. В его конструкцию входят симметричные крылья с пьезоэлектрическими приводами.

В статье [23] описаны конструкция и некоторые результаты испытаний биоинспирированного аппарата Dipper (рис. 5) с крыльями активной стреловидности, который подобно ныряющим птицам складывает крылья при вхождении в воду и расправляет их при взлете с поверхности воды. Предлагаемый аппарат способен летать, погружаться в воду, автоматически маневрировать под водой и динамично возвращаться в горизонтальный полет. Концепция силовой установки, основанная на одном электродвигателе, обеспечивает требуемую динамику передвижения с высокой эффективностью в обеих средах, а также

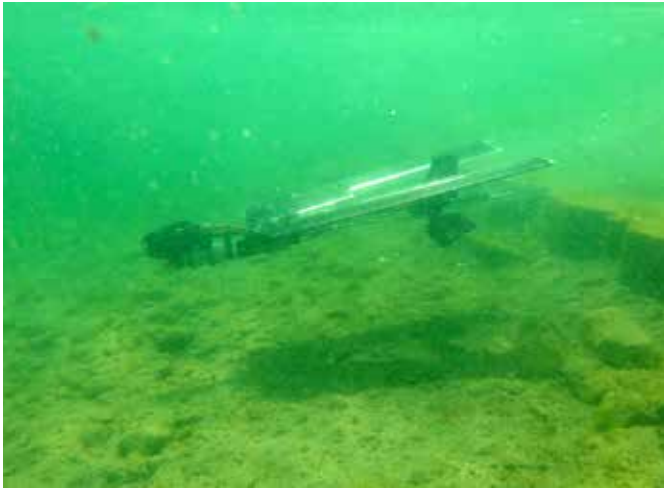


Рис. 5. Биоинспирированный аппарат Dipper со сложенными крыльями при движении под водой

на этапах перехода из подводного положения в воздушное и обратно. Прототип был протестирован в натуральных условиях и показал достаточно высокую надежность. Хотя результаты исследований продемонстрировали универсальные возможности биоинспирированных аппаратов, они по-прежнему далеки от практического применения.

ГВПА, разработанные с использованием принципов проектирования современных беспилотных летательных аппаратов с неподвижным крылом или квадрокоптеров, находят все более широкое применение при решении реальных задач. Они разрабатываются путем их адаптации к подводной среде посредством герметизации движителей и расположения системы управления в прочном корпусе.

Концепция ГВПА с фиксированным крылом, сочетающая типичное изогнутое крыло БПЛА с подводным планером, была рассмотрена в [24, 25]. Отличительными чертами этой концепции являются ее энергоэффективность и высокая маневренность. Такой ГВПА может совершать спиральные движения с шагом менее одного метра, используя хвостовое оперение. Кроме того, он может регулировать положение своего центра плавучести, а также центра тяжести, чтобы перемещаться с меньшими затратами энергии.

При проектировании гибридных беспилотных летательно-подводных аппаратов управление плавучестью и управление положением центра тяжести являются двумя важными факторами. Большой объем крыльев, используемых беспилотными летательными аппаратами для эффективного полета, повышает плавучесть аппаратов, препятствуя их погружению. Системы активного управления плавучестью могут преодолеть это, но требуют больших затрат энергии и времени на переход от движения под водой к по-

лету. В [26] разработчики из Университета Северной Каролины представили альтернативную конструкцию, состоящую из крыла с пассивным затоплением и осушением. Разработана динамическая модель дренажной конструкции, которая экспериментально проверена на полной конструкции крыла. На основе модели был создан макет аппарата длиной 1.5 м, размахом крыльев 1.4 м и весом 7.5 кг (рис. 6), который был успешно испытан в натуральных условиях. В указанной работе приведены некоторые результаты этих испытаний.

Одним из представителей ГВПА квадрокоптерного типа является CRACUNS – американский военный многофункциональный беспилотный летательный аппарат, разработанный специалистами Университета Джона Хопкинса [27]. Аппарат предназначен для выполнения таких задач, как аэросъемка местности, проведение наблюдательных, патрульных и мониторинговых миссий, осуществление разведки местности и пр. Движительный комплекс CRACUNS включает четыре электрических бесщёточных двигателя, которые позволяют дрону развивать максимальную скорость полета до 45 км/ч.

В [28] представлен ГВПА квадрокоптерного типа, в котором пропеллеры способны изменять направление движения с помощью механизма наклона. Когда корпус аппарата находится в воздухе, механизм наклона поворачивает четыре ротора в квазивертикаль-



Рис. 6. Макет ГВПА из Университета Северной Каролины во время морских испытаний

ное положение с учетом направления движения. При погружении корпуса аппарата в воду несущие винты ориентируются в диапазоне от горизонтального до вертикального положения и система обретает свойство векторного движителя, повышая маневренность аппарата под водой.

ГВПА квадрокоптерного типа Loon Copter описан в [29]. Он изменяет свой вес с помощью системы управления плавучестью. Перед взлетом система откачивает воду из балластного резервуара, аппарат всплывает и легко стартует с поверхности. Когда аппарату необходимо погрузиться, система заполняет водой балластный резервуар. Особенностью Loon Copter является то, что когда резервуар заполнен водой, аппарат наклонен таким образом, что винты ориентированы в горизонтальном направлении для обеспечения тяги и управления движением, значительно повышая его маневренность под водой.



Рис. 7. ГВПА CRACUNS

Следует отметить, что аппараты с неподвижным крылом за счет более совершенных аэродинамических характеристик обеспечивают значительную дальность и высокую скорость полета. Однако по сравнению с квадрокоптерами они менее маневренны и не могут летать на низкой скорости или зависать в воздухе в заданной точке. При этом летательным аппаратам с фиксированным крылом трудно избежать ударов при входе в воду, что требует более строгих требований к безопасности конструкции, динамическим характеристикам и системе управления. Для преодоления указанных недостатков разрабатываются комбинированные ГВПА, включающие как неподвижное крыло, так и многороторный движительный комплекс.

По принципу комбинированного ГВПА в Шанхайском университете Цзяотун (SJTU) построен аппарат Nezha, одна из первых версий которого появилась в 2017 году. За последующее время указанный аппарат

значительно эволюционировал. В статье [30] исследована система программного управления (СПУ) аппарата Nezha III, работающего в условиях воздействия волн и ветра. Ее работа основана на использовании динамического контроллера поверхности (DSC) и системы наблюдения за нелинейными возмущениями (NDOS). Предложенная СПУ была протестирована в численном режиме в условиях модельного воздействия ветра и волн. Результаты показывают, что СПУ позволяет Nezha III успешно взлетать и садиться на поверхность воды с возмущениями.

Были проведены численные испытания предложенного метода в сравнении с PID регуляторами. В ходе моделирования были учтены ветровые и волновые помехи, а также насыщение привода, чтобы усложнить работу контроллера. Для получения убедительных результатов предложенный метод и сравниваемый метод были настроены таким образом, чтобы они соответствовали одинаковым базовым характеристикам в тесте. Модельные эксперименты показали, что в случае движения по заданному маршруту предложенный метод обеспечивал более высокую точность отслеживания программной траектории и повышенную устойчивость к неизвестным внешним воздействиям.

В работе [31] сообщается о ГВПА Nezha-IV, все основные функции которого были проверены в реальных условиях океана. Аппарат имеет четыре воздушных винта и восемь подводных подруливающих движителей. Он способен маневрировать в полете и в толще воды, а также выполнять переходы из подводного положения в воздушное пространство и обратно в сложных морских условиях. В статье описаны дизайн, конструкция, система управления и некоторые результаты океанских испытаний Nezha-IV в Южно-Китайском море, которые показывают, что аппарат может работать на глубинах до 50 м и перемещаться под водой со скоростью 1 км/ч в течение 22 мин, а также зависать в воздухе в течение 15 мин или лететь со скоростью 36 км/ч в течение 12 мин и преодолеть дистанцию в 7,2 км.

Осенью 2024 года разработчики представили следующую версию аппарата – Nezha-SeaDart [32] (рис. 8), который является усовершенствованной версией Nezha-IV. В нем при проектировании размеров крыла и тяги аппарата были оптимизированы параметры для всех этапов его работы: воздушного полета, подводного плавания и выхода на поверхность. В ходе 10-дневных испытаний на озере Тысячи островов в провинции Чжэцзян рабочий прототип Nezha-SeaDart успешно выполнил весь цикл заданий и подтвердил свою работоспособность.

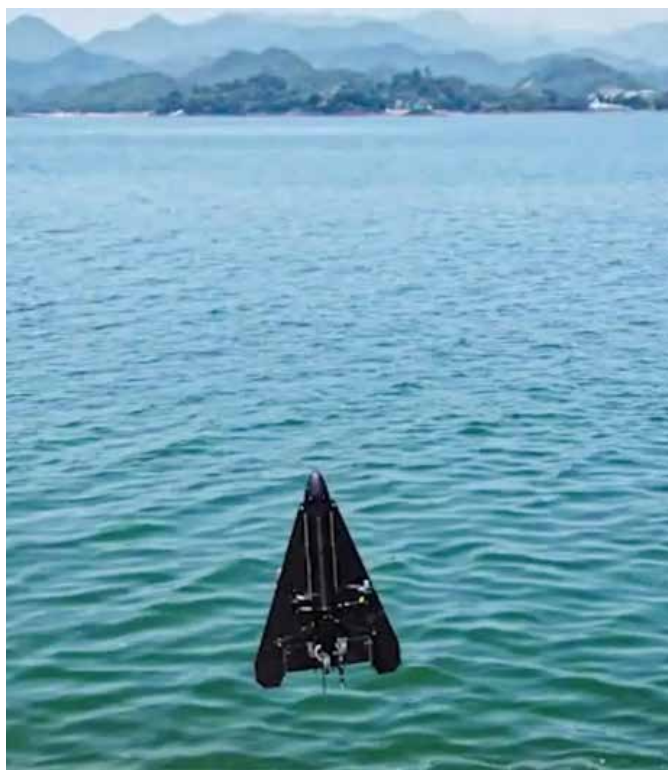


Рис. 8. Рабочий прототип ГВПА Nezha-SeaDart в ходе 10-дневных испытаний на озере Тысячи островов

5. Заключение

Следует отметить, что среди рассмотренных современных направлений развития морских беспилотных комплексов создание ГВПА – это новый взгляд на беспилотные системы, который значительно обогащает существующие автономные беспилотные наблюдательные платформы и повышает технологический уровень междисциплинарной исследовательской деятельности человека под водой и в воздухе. Развитие данного типа аппаратов позволит существенно повысить автоматизацию и уровень интеллектуальности наблюдений за океаном и обеспечит новую технологическую поддержку для создания сложных систем наблюдения за морем и воздушным пространством.

Будущие направления, основанные на современных тенденциях в области создания воздушно-подводных роботов, вероятно, будут связаны с оптимизацией гидродинамических характеристик конструкции ГВПА, разработкой способов входа и выхода из воды, совершенствованием алгоритмов управления для устойчивого движения по заданным траекториям в воде и воздухе, а также созданием систем моделирования и методик натурных экспериментов для ГВПА.

Статья подготовлена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН FWW-2025-0002.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kalwa J., Tietjen D., Alves J., Pascoal A. et al. The European Project MORPH: Distributed UUV Systems for Multimodal, 3D Underwater Surveys // *Marine Technology Society Journal*. 2016. P. 26–41.
2. Campos D., Pereira M., Matos A., Pinto A. Diius-distributed perception for inspection of aquatic structures // *MTS/IEEE OCEANS*. San Diego–Porto, 2021. P. 1–5.
3. Vasilijevic A., Barstein K., Bremnes J. Infrastructure for remote experimentation in the Trondheim fjord // *MTS/IEEE OCEANS*. Limerick, 2023. P. 1–6.
4. Pinto A., Marques J., Campos D., Abreu N., Matos A., Jussi M., Berglund R., Halme J., Tikka P., Formiga J. et al. ATLANTIS – The Atlantic Testing Platform for Maritime Robotics // *MTS/IEEE OCEANS*. San Diego–Porto, 2021. P. 1–5.
5. Neves F., Campos H., Campos D., Almeida P., Pinto A. et al. Shore Control Centre for Multi-Domain Heterogeneous Robotic Vehicles // *MTS/IEEE OCEANS*. Limerick, 2023. P. 1–4.
6. Thales demonstrates the future of unmanned systems in a maritime environment. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thalesgroup.com/en/united-kingdom/news/thales-demonstrates-future-unmanned-systems-maritime-environment-through-uk> (Дата обращения: 23.08.2025).
7. Участники рынка. Тренды. БЭК и ТНПА. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://t.me/searobotics/979> (Дата обращения: 23.08.2025).
8. Ваулин Ю.В., Щербатюк А.Ф. Система отслеживания протяженных объектов на основе телевизионной информации для подводного робота // *Морские технологии*. Владивосток, 2000. Вып. 3. С. 80–91.
9. Бобков В.А., Морозов М.А., Шупикова А.А., Инзарцев А.В. Распознавание подводного трубопровода по стереоснимкам с борта АНПА в задачах инспекции подводных объектов // *Подводные исследования и робототехника*. 2021. № 3(37). С. 36–45.
10. Панчук М.О., Юрманов А.П., Коноплин А.Ю. Система автоматической инспекции проблемных участков протяженных объектов с помощью АНПА // *Подводные исследования и робототехника*. 2025. № 2 (52). С. 41–52.
11. Olszewski P. et al. On Cathodic Protection Monitoring and Inspection of Seabed Pipelines // *MTS/IEEE OCEANS*. Limerick, 2023. P. 1–5.
12. Alexander G. Rumson. The application of fully unmanned robotic systems for inspection of subsea pipelines. *Ocean Engineering* 235, 109214 (2021).
13. Гой В.А., Дубровин Ф.С., Кушнерик А.А., Михайлов Д.Н., Сергеев Н.С., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 3. С. 67–72.
14. Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Исследование некоторых алгоритмов одноплатформенной мобильной навигации АНПА: результаты моделирования и морских испытаний. // *Гирокоспия и навигация*. 2015. № 4. С. 47–52.
15. Sea-Moon Kim et al. Operational concept and design of multiple AUVs for rapid underwater investigation in case of maritime accidents // *MTS/IEEE OCEANS*. Halifax, 2024. P. 1–4.
16. Представлен дрон, способный работать как в воздухе, так и под водой. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/news/2022/01/20/predstavlen-dron-sposobnyj-rabotat-kak-v-vozdue-tak-i-pod-vodoj.html?ysclid=mdrcghcluz903662787> (Дата обращения: 23.08.2025).
17. Nishitani A. et al. Improvement in Combined Aerial and Underwater Drone System and its Field Trial // *MTS/IEEE OCEANS*. Halifax, 2024. P. 1–5.
18. Kawada R. et al. Study on Lightweight Acoustic Positioning for Combined Aerial and Underwater Drones // *MTS/IEEE OCEANS*. Limerick, 2023. P. 1–5.

19. Manley J., Puzzuoli D., Clark J., Hanlon J. Integration of a Passive Acoustic Monitoring System in an Amphibious Quadcopter // MTS/IEEE OCEANS. San Diego–Porto, 2021. P. 1–3.
20. Zeng Z., Lyu C., Bi Y., Jin Y., Lu D., Lian L. Review of hybrid aerial underwater vehicle: Cross-domain mobility and transitions control // Ocean Engineering. 2022. Vol. 248. P. 110840.
21. Yao G., Li Y., Zhang H., Jiang Y., Wang T., Sun F., Yang X. Review of hybrid aquaticaerial vehicle (HAAV): Classifications, current status, applications, challenges and technology perspectives // Progress in Aerospace Sciences. 2023. Vol. 139. P. 100902.
22. Chen Y., Wang H., Helbling F., Jafferis T., Zufferey R., Ong A., Ma K., Gravish N., Chirarattananon P., Kovac M. A biologically inspired, flapping-wing, hybrid aerial-aquatic microrobot // Science Robotics. 2017. No. 2(11). P. 5619.
23. Rockenbauer F., Jeger S., Beltran L., Berger M., Harms M., Kaufmann N., Rauch M., Reinders M., Lawrance N., Stastny T. Dipper: a dynamically transitioning aerial-aquatic unmanned vehicle // ROBOTICS: SCIENCE AND SYSTEM (RSS 2021), July 12–16, 2021.
24. Wang J., Yang Y., Wu J., Zeng Z., Lu D., Lian L. Hybrid aerial-aquatic vehicle for large scale high spatial resolution marine observation // MTS/IEEE OCEANS. Marseille, 2019. P. 1–7.
25. Huang D., Liu X., Dou M., Chen B. Systematizing rotor-based morphable unmanned aerial-aquatic vehicles design: From theory to prototype // MTS/IEEE OCEANS. Singapore, 2024. P. 1–9.
26. Stewart W., Weisler W., Anderson M., Bryant M., Peters K. Dynamic modeling of passively draining structures for aerial-aquatic unmanned vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2020. No. 45(3). P. 840–850.
27. CRACUNS. Технические характеристики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://avia.pro/blog/cracuns-tehnicheskie-harakteristiki-foto> (Дата обращения: 23.08.2025).
28. Tan Y., Chen B. Design of a Morphable Multirotor Aerial-Aquatic Vehicle // MTS/IEEE OCEANS. Seattle, 2019. P. 1–8.
29. Alzubi H., Mansour I., Rawashdeh O. Loon Copter: implementation of a hybrid unmanned aquatic-aerial quadcopter with active buoyancy control // Journal of Field Robotics. 2018. No. 35(5). P. 764–778.
30. Lu D., Xiong C., Zhou H., Lyu C., Hu R., Yu C., Zeng Z., Lian L. Design, fabrication, and characterization of a multimodal hybrid aerial underwater vehicle // Ocean Engineering. 2021. Vol. 219. P. 108324.
31. Jin Y., Bi Y., Lyu C., Bai Y., Zeng Z., Lian L. Nezha-IV: A hybrid aerial underwater vehicle in real ocean environments // Journal of Field Robotics. 2024. No. 41(2). P. 420–442.
32. Amphibious SeaDart: High-speed drone can hover, fly and dive. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://newatlas.com/drones/chinese-hauv-drone-nezha-seadart/> (Дата обращения: 23.08.2025).

Сведения об авторе

ЩЕРБАТЮК Александр Федорович, д.т.н., чл.-корр. РАН,
главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ин-
ститут автоматизации и процессов управления ДВО РАН
Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, 5
Научные интересы: разработка и использование морских робо-
тотехнических комплексов, навигационное обеспечение нео-
битаемых подводных аппаратов
Тел. +7(902)52-38-156
E-mail: alex-scherba@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0002-7600-6711

Для цитирования:

Щербатюк А.Ф. О НЕКОТОРЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГИБРИДНЫХ МОРСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ // Подводные исследования и робототехника. 2025. № 3 (53). С. 81–92. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_53_03_08. EDN: JWRHAP.



ABOUT SOME DIRECTIONS OF EVOLUTION AND APPLICATION FOR MODERN HYBRID MARINE UNMANNED VEHICLES

A.F. Scherbatyuk

The article discusses some modern technological trends in the development of marine unmanned hybrid vehicles, which include underwater, surface and aerial vehicles. The main objectives of such work, along with solving new tasks, are to increase the reliability and safety of performing relevant work by eliminating the presence of humans in the area of their implementation, as well as reducing the cost of marine robotic systems and reducing operating costs primarily by avoiding the use of expensive ship support.

Keywords: marine hybrid vehicles, autonomous underwater vehicles, remotely operated vehicles, unmanned boats, unmanned aerial vehicles.

References

1. J. Kalwa, D. Tietjen, J. Alves, A. Pascoal *et al.* The European Project MORPH: Distributed UUV Systems for Multimodal, 3D Underwater Surveys. *Marine Technology Society Journal*, July, 2016, p. 26-41.
2. D. Campos, M. Pereira, A. Matos, A. Pinto. DIHUS-distributed perception for inspection of aquatic structures, MTS/IEEE OCEANS 2021, San Diego–Porto, p. 1-5.
3. A. Vasilijevic, K. Barstein, J. Bremnes. Infrastructure for remote experimentation in the Trondheim fjord, MTS/IEEE OCEANS 2023, Limerick, p. 1-6.
4. A. Pinto, J. Marques, D. Campos, N. Abreu, A. Matos, M. Jussi, R. Berglund, J. Halme, P. Tikka, J. Formiga, *et al.* ATLANTIS - The Atlantic Testing Platform for Maritime Robotics, MTS/IEEE OCEANS 2021, San Diego–Porto, p. 1–5.
5. F. Neves, H. Campos, D. Campos, P. Almeida, A. Pinto *et al.* Shore Control Centre for Multi-Domain Heterogeneous Robotic Vehicles, MTS/IEEE OCEANS 2023, Limerick, p. 1-4.
6. Thales demonstrates the future of unmanned systems in a maritime environment. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.thalesgroup.com/en/united-kingdom/news/thales-demonstrates-future-unmanned-systems-maritime-environment-through-uk> (Date of request: 23.08.2025).
7. Market participants. Trends. BEK and TNPA. [Electronic resource]. – Access mode: <https://t.me/searobotics/979> (Date of request: 23.08.2025).
8. Vaulin Y.V., Scherbatyuk A.Ph. A system for tracking extended objects based on television information for an underwater robot. *Marine technology*. Vladivostok, 2000. Vol. 3, p. 80-91.
9. Bobkov V.A., Morozov M.A., Shupikova A.A., Inzartcev A.V. Underwater pipeline recognition using autonomous underwater vehicle by stereo images in the tasks of inspection of underwater objects. *Underwater investigation and robotics*. 2021. No. 3(37). P. 36–45. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_37_03_04.
10. Panchuk M.O., Yurmanov A.P., Konoplin A.Yu. Automatic inspection system for problem sections of extended objects using AUV. *Underwater investigations and robotics*. 2025. No. 2 (52). P. 41–52. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_52_02_04. EDN: QMEQLB.
11. Patryk Olszewski *et al.* On Cathodic Protection Monitoring and Inspection of Seabed Pipelines, MTS/IEEE OCEANS 2023, Limerick, p. 1–5.
12. Alexander G. Rumson. The application of fully unmanned robotic systems for inspection of subsea pipelines. *Ocean Engineering* 235, 109214 (2021).
13. Goy V.A., Dubrovin F.S., Kushnerik A.A., Mikhailov D.N., Sergeenko N.S., Tuphanov I.E., Scherbatyuk A.Ph. A marine robotic complex that includes autonomous, unmanned underwater and surface vehicles // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, No. 3, 2014, p. 67-72.
14. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.Ph. Investigation of some algorithms of AUV single-beacon mobile navigation: simulation results and sea trials. // *Gyroscopy and Navigation*, No. 4, 2015, p. 47-52.
15. Sea-Moon Kim *et al.* Operational concept and design of multiple AUVs for rapid underwater investigation in case of maritime accidents, MTS/IEEE OCEANS 2024, Halifax, p. 1–4.
16. Drone capable of operating both in the air and underwater is presented. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ixbt.com/news/2022/01/20/predstavlen-dron-sposobnyj-rabotat-kak-v-vozduhe-tak-i-pod-vodoj.html?ysclid=mdreghcluz903662787> (Date of request: 23.08.2025).
17. A. Nishitani *et al.* Improvement in Combined Aerial and Underwater Drone System and its Field Trial, MTS/IEEE OCEANS 2024, Halifax, p. 1–5.

18. R. Kawada *et al.* Study on Lightweight Acoustic Positioning for Combined Aerial and Underwater Drones, MTS/IEEE OCEANS 2023, Limerick, p. 1–5.

19. J. Manley, D. Puzzuoli, J. Clark, J. Hanlon. Integration of a Passive Acoustic Monitoring System in an Amphibious Quadcopter, MTS/IEEE OCEANS 2021, San Diego–Porto, p. 1–3.

20. Zeng Z., Lyu C., Bi Y., Jin Y., Lu D., Lian L. Review of hybrid aerial underwater vehicle: Cross-domain mobility and transitions control. *Ocean Engineering* 248, 110840 (2022)

21. Yao G., Li Y., Zhang H., Jiang Y., Wang T., Sun F., Yang X. Review of hybrid aquaticaerial vehicle (HAAV): Classifications, current status, applications, challenges and technology perspectives. *Progress in Aerospace Sciences* 139, 100902 (2023)

22. Chen Y., Wang H., Helbling F., Jafferis T., Zufferey R., Ong A., Ma K., Gravish N., Chirarattananon P., Kovac M. A biologically inspired, flapping-wing, hybrid aerial-aquatic microrobot. *Science Robotics* 2(11), 5619 (2017)

23. Rockenbauer F., Jeger S., Beltran L., Berger M., Harms M., Kaufmann N., Rauch M., Reinders M., Lawrance N., Stastny T. Dipper: a dynamically transitioning aerial-aquatic unmanned vehicle. //ROBOTICS: SCIENCE AND SYSTEM (RSS 2021), July 12–16, 2021.

24. Wang J., Yang Y., Wu J., Zeng Z., Lu D., Lian L. Hybrid aerial-aquatic vehicle for large scale high spatial resolution marine observation. MTS/IEEE OCEANS 2019, Marseille, p. 1–7.

25. Huang D., Liu X., Dou M., Chen B. Systematizing rotor-based morphable unmanned aerial-aquatic vehicles design: From theory to prototype. MTS/IEEE OCEANS 2024, Singapore, p. 1–9.

26. Stewart W., Weisler W., Anderson M., Bryant M., Peters K. Dynamic modeling of passively draining structures for aerial-aquatic unmanned vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 45(3), 840–850 (2020)

27. CRACUNS. Technical specifications. [Electronic resource]. – Access mode: <https://avia.pro/blog/cracuns-tehnicheskie-harakteristiki-foto> (Date of request: 23.08.2025).

28. Tan Y., Chen B. Design of a Morphable Multirotor Aerial-Aquatic Vehicle. MTS/IEEE OCEANS 2019, Seattle, p. 1–8.

29. Alzubi H., Mansour I., Rawashdeh O. Loon Copter: implementation of a hybrid unmanned aquatic-aerial quadcopter with active buoyancy control. *Journal of Field Robotics* 35 (5), 764–778 (2018).

30. Lu D., Xiong C., Zhou H., Lyu C., Hu R., Yu C., Zeng Z., Lian L. Design, fabrication, and characterization of a multimodal hybrid aerial underwater vehicle. *Ocean Engineering* 219, 108324 (2021).

31. Jin Y., Bi Y., Lyu C., Bai Y., Zeng Z., Lian L. Nezha-IV: A hybrid aerial underwater vehicle in real ocean environments. *Journal of Field Robotics* 41(2), 420–442 (2024).

32. Amphibious SeaDart: High-speed drone can hover, fly and dive. [Electronic resource]. – Access mode: <https://newatlas.com/drones/chinese-hauv-drone-nezha-seadart/> (Date of request: 23.08.2025).



Recommended citation:

Scherbatyuk A.F. ABOUT SOME DIRECTIONS OF EVOLUTION AND APPLICATION FOR MODERN HYBRID MARINE UNMANNED VEHICLES. *Underwater investigations and robotics*. 2025. No. 3 (53). C. 81–92. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_53_03_08. EDN: JWRHAP.