

Автономные необитаемые подводные аппараты: развитие роботизированных систем в XXI веке

П. В. Кудрин, Л. В. Пасечный, Ч. Ч. Петрович

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

pvkudrin@stud.etu.ru, leonidpasechnyi@yandex.ru

Аннотация. В условиях перехода к сетцентрическим морским операциям XXI века ключевой проблемой является обеспечение скрытности и автономности технических средств в подводной среде. Традиционные методы обнаружения и навигации сталкиваются с ограничениями, связанными с высокой помеховой обстановкой и необходимостью минимизации акустического следа аппаратов. На основе анализа трудов Г.Ю. Илларионова, А.С. Сиденко и архивных материалов фондов Мемориального музея А.С. Попова СПбГЭТУ «ЛЭТИ» рассмотрена эволюция автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и показана роль фундаментальных отечественных разработок в области гидроакустики и помехоустойчивости в создании современных «тихих» робототехнических систем. Результаты. В статье показана неразрывная связь между теорией помехозащищенности академика А.Н. Щукина и современными алгоритмами цифровой обработки сигналов, применяемыми в АНПА. Обоснована эффективность использования бионических принципов движения и глайдеров для достижения высокой скрытности. Выявлено, что научная школа ЛЭТИ обеспечила замкнутый цикл разработки подводных систем: от физики ультразвука до интеллектуальных навигационных модулей на базе MEMS-технологий. Определены перспективы применения АНПА в качестве автономных узлов информационных сетей для защиты инфраструктуры и исследования шельфа.

Ключевые слова: АНПА, ЛЭТИ, И.Г. Фрейман, А.Н. Щукин, Г.Ю. Илларионов, гидроакустика, биомиметика, ультразвуковая техника, сетцентрические системы, помехоустойчивость

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях глобальной цифровизации и стратегического перехода к концепции «сетцентрического» пространства в Мировом океане, развитие подводной робототехники становится одним из приоритетных направлений научно-технического прогресса. Современный этап характеризуется смещением акцентов от массивных обитаемых платформ к гибким, распределенным системам. АНПА XXI века представляют собой высокотехнологичные комплексы, интегрирующие последние достижения в области микросистемной техники (MEMS), прикладного искусственного интеллекта и инновационных методов цифровой обработки сложных акустических сигналов.

Основной вызов современности заключается в обеспечении так называемой «прозрачности океана». Это требует от разработчиков создания аппаратов с беспрецедентным уровнем гидроакустической скрытности и способности к длительному (автономному)

функционированию в отрыве от судов обеспечения. Интеграция АНПА в единую систему управления (концепция «Морская мощь – 21») превращает подводный аппарат из одиночного инструмента в активный узел глобальной информационной сети, способный в реальном времени транслировать данные о тактической обстановке.

Развитие данных технологий не является спонтанным – оно опирается на фундаментальный теоретический и прикладной базис, заложенный десятилетиями исследований в области гидродинамики, подводной навигации и акустики. Особое место в этой эволюции занимает отечественная инженерная школа, которая прошла путь от создания первых экспериментальных образцов до проектирования интеллектуальных роботоневидимок, способных решать задачи как оборонного, так и гражданского характера – от охраны критической инфраструктуры на шельфе до глубоководных научных изысканий.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

A. Исторические этапы и преемственность научных школ

Становление отечественных систем обнаружения и подводной робототехники базируется на научно-образовательном фундаменте, заложенном в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Историческая преемственность здесь прослеживается от фундаментальных разработок в области радиосвязи начала XX века до создания интеллектуальных гидроакустических комплексов современности. У истоков этих разработок стоял выдающийся ученый, заведующий кафедрой радиотехники ЛЭТИ профессор И.Г. Фрейман, военный моряк, первый председатель секции связи и наблюдения НТК МС, чья деятельность в 1920–1930-е годы в стенах института и Центральной радиолaborатории (ЦРЛ) Электротехнического треста заводов слабого тока (ЭТЗСТ) в качестве научного консультанта, стала определяющей для создания первых отечественных ламповых систем связи и теории антенных сооружений. Именно Имант Георгиевич Фрейман поставил вопрос о необходимости разработки гидроакустических средств для флота и привлёк к этим работам своего ученика С.Я. Соколова. На основании большого практического опыта и фундаментальных знаний в области радиотехники на мировом уровне Фрейман сформировал инженерный подход к решению практических задач радиотехники, при котором теоретические изыскания в области электромагнитных

колебаний находили прямое применение в прикладных системах флота [5].

Преемником этих идей стал его ученик, выпускник ЛЭТИ 1927 года, академик АН СССР А.Н. Щукин. В 1940-е годы он разработал фундаментальную теорию распространения радиоволн и методы защиты от помех, что имело решающее значение для развития радиолокации. Однако научное наследие Щукина оказалось гораздо шире: его математические модели помехоустойчивости и методы выделения полезного сигнала из шумов легли в основу современной цифровой обработки сигналов (ЦОС), применяемой в АНПА XXI века. В условиях подводной среды, где акустический сигнал подвергается сильным искажениям и затуханию, алгоритмы ЦОС, базирующиеся на «щукинских» принципах фильтрации и статистического анализа, позволяют бортовым компьютерам автономных аппаратов идентифицировать цели и ориентироваться в пространстве с предельной точностью. Таким образом, теоретические работы середины прошлого века сегодня трансформировались в программные коды интеллектуальных систем навигации и связи.

Накопленный десятилетиями опыт в области акустики и электроники позволил в период 1990–2000-х годов перейти к проектированию специализированных необитаемых аппаратов. В этот период Г.Ю. Илларионов обосновывает концепции применения АНПА, уделяя особое внимание противоминным системам и их интеграции в сетевые структуры. Переход к новому тысячелетию ознаменовался окончательным оформлением преемственности: от ламповых передатчиков Фреймана и теории помехоустойчивости Щукина к «сетевым» моделям управления Илларионова. Сегодня эта связь поколений находит выражение в способности российских АНПА действовать в сложной гидроакустической обстановке, используя алгоритмы обработки данных, фундамент которых был заложен в лабораториях ЛЭТИ еще на заре радиотехнической эры.

В. Роль ЛЭТИ в развитии гидроакустики и ультразвуковой техники

Развитие «тихих» систем XXI века и создание эффективных методов обнаружения в водной среде неразрывно связаны с деятельностью старейших научно-педагогических школ ЛЭТИ. Центральное место в этом процессе занимает кафедра электроакустики и ультразвуковой техники (ЭАУТ), которая на протяжении десятилетий является ведущим центром разработки ультразвуковых систем в стране. Специалисты кафедры внесли определяющий вклад в создание теоретических моделей распространения звуковых волн в неоднородной водной среде, что стало базисом для проектирования высокочувствительных датчиков и антенных решеток, используемых в современных АНПА. Исследования в области физики звука, проводимые такими учеными, как С.Я. Соколов (основатель дефектоскопии и акустической микроскопии), позволили выйти на новый уровень понимания того, как ультразвук взаимодействует с объектами и средой.

Прикладное значение этих работ для подводной робототехники проявилось в создании алгоритмов селекции полезного сигнала на фоне интенсивных

гидроакустических помех. Внедрение методов цифровой обработки, развиваемых на базе профильных лабораторий института, позволило повысить чувствительность поисковых систем АНПА при сохранении их собственной акустической скрытности. Важным направлением работы вуза стало проектирование широкополосных пьезокерамических преобразователей, которые являются «ушами» и «голосом» любого необитаемого аппарата. Способность этих устройств работать в широком диапазоне частот позволяет АНПА не только эффективно обнаруживать минные заграждения и элементы донной инфраструктуры, но и поддерживать защищенную связь с носителем.

Кроме того, научные коллективы ЛЭТИ активно занимались вопросами микросистемной техники. Внедрение инерциальных систем навигации на основе микроэлектромеханических структур (MEMS) стало возможным благодаря междисциплинарному взаимодействию кафедр электроники и приборостроения. Это позволило радикально уменьшить габариты навигационных модулей, что является критическим фактором для микро-АНПА и аппаратов бионического типа, описанных в работах Г.Ю. Илларионова. Таким образом, ЛЭТИ сформировал замкнутый цикл научно-технического сопровождения: от фундаментальной теории ультразвука и материаловедения пьезокерамики до создания готовых программно-аппаратных комплексов гидролокации, определяющих облик подводного флота XXI века.

С. Принципы функционирования, технологические особенности

Технологическая база АНПА в XXI веке характеризуется отходом от традиционных инженерных решений в пользу гибких, энергоэффективных и малозаметных систем. Одной из ключевых особенностей современных российских разработок, подробно рассматриваемых в трудах Г.Ю. Илларионова, является внедрение бионических принципов (биомиметики). В отличие от классических винтовых двигателей, которые создают значительный акустический шум и кавитацию, биомиметические аппараты используют волновой принцип движения, имитирующий работу хвостового оперения и плавников морских обитателей – тунцов, акул или угрей. Такой подход позволяет не только радикально снизить гидроакустический след аппарата, делая его неотличимым от природного фона, но и значительно повысить маневренность на малых скоростях, что критически важно при обследовании сложных донных объектов.

Вторым важным аспектом функционирования является достижение беспрецедентной энергетической автономности. Согласно материалам книги, современная классификация включает в себя аппараты, использующие альтернативные источники энергии, такие как температурный градиент океана или солнечную энергию (программы типа SAUV). Особое место занимают «планирующие» системы – подводные глайдеры. Принцип их работы основан на изменении собственной плавучести за счет перекачки жидкости внутри прочного корпуса, что заставляет аппарат совершать волнообразные движения (нырки и подъемы),

продвигаясь вперед практически бесшумно. Отсутствие постоянно работающего двигателя позволяет таким системам находиться в режиме патрулирования в течение многих месяцев, покрывая расстояния в тысячи километров.

Скрытность аппаратов также обеспечивается за счет глубокой миниатюризации бортовых систем. Использование микроаппаратов («микро-АНПА») весом в несколько килограммов позволяет выполнять разведывательные задачи в портах и узкостях, оставаясь вне зоны чувствительности стандартных активных сонаров противника. Весь массив собираемых данных обрабатывается бортовыми интеллектуальными системами, которые способны самостоятельно классифицировать обнаруженные объекты и принимать решения о смене маршрута или режима работы. Таким образом, технологический облик АНПА XXI века определяется синергией природы и высоких технологий: от «тихих» бионических движителей до сверхмалых интеллектуальных сенсоров, обеспечивающих полную независимость от надводных носителей.

D. Перспективы применения АНПА в современных условиях

В XXI веке область эксплуатации автономных необитаемых аппаратов претерпевает качественную трансформацию: из вспомогательных средств они превращаются в самостоятельные стратегические инструменты. Основным вектором развития становится их интеграция в глобальные информационные системы, где АНПА выполняют роль интеллектуальных узлов сбора данных. Одной из наиболее значимых перспектив является обеспечение комплексной безопасности морской инфраструктуры. Автономные системы способны осуществлять непрерывный мониторинг состояния подводных трубопроводов, кабелей связи и портовых сооружений, обнаруживая признаки повреждений или стороннего вмешательства на ранних стадиях.

Другим важным направлением является научное и ресурсное освоение Мирового океана. Благодаря высокой автономности и способности работать на критических глубинах, АНПА обеспечивают детальное картографирование морского дна и проведение геологоразведочных работ в труднодоступных районах, включая арктический шельф. Использование групп аппаратов, действующих по принципу «роя», позволяет проводить масштабные экологические исследования и мониторинг водных биоресурсов с минимальным воздействием на окружающую среду.

Информационное взаимодействие также остается приоритетной задачей. Современные аппараты выступают в роли мобильных ретрансляторов, обеспечивая устойчивый канал связи между донными сенсорными сетями и спутниковыми группировками. Это позволяет создавать динамические карты подводной обстановки в режиме реального времени, что необходимо для навигационной безопасности и оперативного реагирования на любые изменения в акватории. Таким образом, перспективы применения АНПА лежат в плоскости создания полностью автономных систем контроля, которые сочетают в себе функции исследователя, охранника и связного, обеспечивая эффективное присутствие человека в океане

без его непосредственного участия в опасных и трудоемких операциях.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог проведенному анализу, можно констатировать, что развитие автономных необитаемых подводных аппаратов в XXI веке является закономерным результатом эволюции отечественной инженерной мысли. Фундаментальный задел, сформированный в стенах ЛЭТИ профессором И.Г. Фрейманом и академиком А.Н. Шукиным, позволил создать уникальную базу для решения современных задач гидроакустики и навигации. Теории помехоустойчивости и распространения волн, разработанные еще в середине XX века, сегодня находят свое прямое воплощение в алгоритмах цифровой обработки сигналов, обеспечивающих функционирование «тихих» и скрытных систем в условиях сложной помеховой обстановки мирового океана.

Современный этап развития АНПА характеризуется качественным переходом от простых телеуправляемых механизмов к интеллектуальным роботизированным комплексам. Внедрение бионических принципов движения и систем на основе микромеханики (MEMS), подробно описанных в трудах Г. Ю. Илларионова и А. С. Сиденко, открывает новые возможности для обеспечения скрытности и долгосрочной автономности подводных операций. Эти технологии позволяют не только повысить эффективность защиты национальных интересов, но и обеспечить безопасное и экологичное освоение ресурсов океана, от мониторинга арктического шельфа до охраны критически важных объектов донной инфраструктуры.

Будущее подводной робототехники неразрывно связано с развитием концепции сетцентрических систем, где автономные аппараты выступают в роли ключевых элементов единого информационного пространства. Преемственность научных школ, сочетающая в себе классическую академическую базу и инновационные подходы к проектированию, остается главным фактором, обеспечивающим лидирующие позиции в создании «умного» и бесшумного подводного флота XXI века.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Агеев М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко [и др.], под общ. ред. М.Д. Агеева. Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. Москва: Наука, 2005. 398 с.
- [2] Агеев М.Д. Необитаемые подводные аппараты военного назначения: монография / М.Д. Агеев, Л.А. Наумов, Г.Ю. Илларионов [и др.]; под ред. М.Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2005. 168 с.
- [3] Бочаров Л.Ю., Сигов А.С. Перспективы развития инерциальных навигационных систем на основе MEMS-технологий // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2003. № 4. С. 67–75.
- [4] Бочаров Л.Ю. Современные тенденции в развитии миниатюрных подводных аппаратов и роботов за рубежом // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 36–52.
- [5] Имант Георгиевич Фрейман. Избранные труды / сост. – к.т.н. Л.И. Золотинкина, вступ. статьи; под ред. д.т.н. В.Н. Ушакова. СПб.: Изд-во «Пропаганда», 2015. 340 с.
- [6] Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С. Автономные необитаемые подводные микроаппараты и их возможное применение в военной сфере // Научно-технические технологии. 2009. № 3. Т. 10. С. 39–49.

- [7] Илларионов Г.Ю. Необитаемые подводные аппараты и их системы. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1990. 56 с.
- [8] Илларионов Г.Ю. Подводные роботы в минной войне / Г.Ю. Илларионов, К.С. Сиденко, В.В. Сидоренков. Калининград: Янтарный сказ, 2008. 117 с.
- [9] Литвиненко Е.Я. Противоминные обитаемые подводные аппараты / Е.Я. Литвиненко, Г.Ю. Илларионов, В.В. Сидоренков. Санкт-Петербург: Судостроение, 2005.
- [10] Сиденко К.С., Илларионов Г.Ю. Роль и место противоминных обитаемых подводных аппаратов в современной морской стратегии // Арсенал (военно-промышленное обозрение). 2008. № 1. С. 102–109.
- [11] Щукин А.Н. Распространение радиоволн. Москва: Связьиздат, 1940. 400 с.
- [12] Щукин А.Н. Динамические и флюктуационные ошибки управляемых объектов. Москва: Сов. радио, 1961. 214 с.