

Научная статья

УДК 519.23

<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2025.1.2>



## Методы структурно-параметрического синтеза автономных необитаемых подводных аппаратов, предназначенных для решения задач в интересах минерально-сырьевого комплекса

Дмитрий Анатольевич Первухин<sup>1\*</sup>, Дмитрий Дмитриевич Котов<sup>2</sup>, Юрий Марсович Искандеров<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup> [pervuchin@rambler.ru](mailto:pervuchin@rambler.ru); <https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

<sup>2</sup> [dmk.kotov@gmail.com](mailto:dmk.kotov@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-2001-9118>

<sup>3</sup> [iskanderov.y@iias.spb.su](mailto:iskanderov.y@iias.spb.su); <https://orcid.org/0000-0002-8168-6504>

\* Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Анатольевич Первухин, [pervuchin@rambler.ru](mailto:pervuchin@rambler.ru)

***Аннотация.** В данной статье представлены выводы, сделанные по результатам исследования процесса разработки автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Исследование показывает, что разработка АНПА — это сложный и многодисциплинарный процесс, в котором задействован широкий спектр технических и нетехнических факторов. В нем также подчеркиваются проблемы и ограничения, которые замедляют процесс разработки. На основании этих выводов в статье дается несколько рекомендаций по улучшению процесса разработки АНПА, таких как использование модульных и масштабируемых конструкций, постановка четких целей, формирование партнерств и сотрудничество с регулирующими и политическими органами. Принятие этих рекомендаций может значительно улучшить процесс разработки и вывести на рынок новые и инновационные технологии АНПА, способствуя дальнейшему развитию области разработки АНПА. В целом, данное исследование дает ценное представление о сложностях разработки АНПА и определяет возможности для улучшения, которые могут ускорить разработку новых технологий для АНПА.*

**Ключевые слова:** автономные необитаемые подводные аппараты, система управления, архитектура системы управления, синтез системы управления, устойчивое развитие МСК

**Для цитирования:** Первухин Д. А., Котов Д. Д., Искандеров Ю. М. Методы структурно-параметрического синтеза автономных необитаемых подводных аппаратов, предназначенных для решения задач в интересах минерально-сырьевого комплекса // Современная наука и инновации. 2025. № 1. С. 18-40. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2025.1.2>

Research article

## Methods of structural-parametric synthesis of autonomous underwater vehicles designed to solve problems in the interests of the mineral resources complex

Dmitry A. Pervukhin<sup>1\*</sup>, Dmitry D. Kotov<sup>2</sup>, Yuri M. Iskanderov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup> [pervuchin@rambler.ru](mailto:pervuchin@rambler.ru); <https://orcid.org/0000-0003-3547-2932>

<sup>2</sup> [dmk.kotov@gmail.com](mailto:dmk.kotov@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-2001-9118>

<sup>3</sup> [iskanderov.y@iias.spb.su](mailto:iskanderov.y@iias.spb.su); <https://orcid.org/0000-0002-8168-6504>

\* Corresponding author: Dmitry A. Pervukhin, [pervuchin@rambler.ru](mailto:pervuchin@rambler.ru)

© Первухин Д. А., Котов Д. Д., Искандеров Ю. М., 2025

**Abstract.** *This paper presents the conclusions drawn from a study of the development process of autonomous unmanned underwater vehicles (AUV). The study reveals that the development of AUV is a complex and multidisciplinary process involving a wide range of technical and non-technical factors. It also highlights the challenges and constraints that slow down the development process. Based on these findings, the article makes several recommendations to improve the AUV development process, such as using modular and scalable designs, setting clear goals, forming partnerships, and collaborating with regulatory and policy agencies. Adopting these recommendations can significantly improve the development process and bring new and innovative AUV technologies to the market, further advancing the field of AUV development. Overall, this study provides valuable insight into the complexities of AUV development and identifies opportunities for improvement that can accelerate the development of new technologies for AUV.*

**Keywords:** autonomous underwater vehicles, control system, architecture control system, synthesis of control system, sustainable development of MSCs

**For citation:** *Pervukhin DA, Kotov DD, Iskandarov YuM. Methods of structural and parametric synthesis of autonomous underwater vehicles designed to solve problems in the interests of the mineral resource complex. Modern Science and Innovations. 2025;(1):18-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2025.1.2>*

**Введение.** Автономные необитаемые подводные аппараты — это подводные роботы, которые могут работать в подводной среде без непосредственного вмешательства человека [1]. Эти аппараты оснащены различными датчиками и инструментами, которые позволяют им собирать данные и выполнять такие задачи, как составление карты океанского дна, проверка состояния морской инфраструктуры и наблюдение за морскими обитателями [2]. Развитие АНПА прошло долгий путь с момента создания первых прототипов в 1960-х годах. Сегодня АНПА используются в широком спектре приложений и стали неотъемлемой частью изучения и исследования океана [3]. Однако процесс разработки АНПА является сложным и требует интеграции различных технологий, включая движительные, навигационные, коммуникационные и энергетические системы [4]. В данном исследовании мы изучим текущее состояние разработки АНПА и выделим некоторые проблемы и возможности, существующие в этой области. Мы также представим предложения о том, как можно улучшить процесс разработки.

Одними из основных проблем при разработке АНПА являются высокие требования к производительности, надежности и стоимости [5]. АНПА должны быть способны работать в сложной среде, где они подвергаются воздействию высокого давления, экстремальных температур и ограниченной видимости [6]. В то же время они должны быть достаточно надежными и долговечными, чтобы выдерживать длительное погружение и не требовать частого технического обслуживания или ремонта [7]. Наконец, АНПА должны быть экономически эффективными в производстве и эксплуатации, поскольку они часто используются в тех случаях, когда бюджет ограничен [8]. Чтобы решить эти задачи, разработчики АНПА должны тщательно спроектировать и испытать различные компоненты и системы, из которых состоит аппарат. Сюда входят корпус, двигательная и рулевая системы, датчики и приборы, а также системы питания и связи [9]. Каждый из этих компонентов должен быть качественно интегрирован в аппарат для обеспечения эффективной работы АНПА [10].

Помимо этих технических проблем, разработка АНПА также требует значительных инвестиций в исследования [11]. Сюда входят как фундаментальные, так и прикладные исследования, а также разработка прототипов и демонстрационных образцов [12]. Научно-исследовательские работы дорогостоящие, требуют много времени, и предполагают сотрудничество между исследователями из различных областей и организаций. Несмотря на эти проблемы, потенциальные преимущества АНПА огромны. АНПА могут предоставить ценные данные об океанической среде, что может помочь нам лучше понять

нашу планету [13]. Они также могут быть использованы для выполнения задач, которые слишком опасны для человека, например, для осмотра морских нефтегазовых платформ или поиска затонувших судов [14].

Существует несколько способов улучшить процесс разработки АНПА, чтобы ускорить развертывание этих ценных активов в океане. Один из подходов заключается в поощрении сотрудничества и обмена знаниями между исследователями и разработчиками [15]. Это может быть сделано путем объединения групп исследователей или создания платформ с открытым исходным кодом, где можно обмениваться данными и программным обеспечением. Еще один способ улучшить процесс разработки АНПА - инвестировать в обучение и подготовку следующего поколения разработчиков АНПА [16]. Этот способ включает разработку обучающих программ, обеспечивающих практический опыт проектирования и разработки АНПА, или создание стипендий или стажировок для поддержки студентов, заинтересованных в карьере в этой области. Наконец, правительства и частные организации могут поддержать развитие АНПА, предоставив финансирование для научно-исследовательских и демонстрационных проектов. Это может включать поддержку разработки новых технологий или расширение существующих возможностей, таких как разработка новых датчиков или интеграция алгоритмов искусственного интеллекта [17].

В заключение следует отметить, что разработка АНПА — это сложный и трудный процесс, требующий интеграции различных технологий и вложения значительных ресурсов в НИОКР. Однако потенциальные преимущества этих подводных роботов огромны, и есть несколько способов улучшить процесс разработки.

Существующие проблемы в области. В настоящее время АНПА являются одним из наиболее перспективных направлений развития робототехники [18]. Однако текущее состояние технологий, используемых при разработке АНПА, и современная методология их проектирования не позволяют реализовать все возможные функции АНПА [19]. Основной проблемой, связанной с разработкой АНПА, является отсутствие результатов исследований по созданию систем управления, отвечающих современным требованиям к качеству решаемых задач.

По мнению экспертов, наиболее перспективным направлением в автоматизации АНПА является широкий спектр исследований в области применения искусственного интеллекта в системах управления [20].

АНПА должен стабильно и эффективно выполнять заданные функции в неопределенной среде, которая может быть, как частично, так и полностью неопределенной [21]. Функции АНПА при решении задач АНПА приведены на рис. 1. В то же время, независимо от функционального назначения системы управления, она должна полностью обеспечивать:

- Принятие быстрых решений по задаче;
- Качественное распознавание образов;
- Выбор математически оптимальных маршрутов движения;
- Корректирования принятые решения в зависимости от внешних воздействий;
- Полную отчетность о выполненных действия;
- Возврат в точку старта при окончании выполнении программы.



**Рисунок 1 – Функции АНПА при решении задач для минерально-сырьевого комплекса / Figure 1 – ANPA functions in solving problems for the mineral resource complex**

Многие морские исследовательские лаборатории разрабатывают системы, которые в будущем позволят осуществлять подводные миссии на большие расстояния [22]. Другим важным направлением является создание и разработка небольших систем управления и связи, а также двигателей.

Актуальность разработки АНПА в России определяется несколькими существенными факторами [23]:

- обширностью богатых сырьевыми (в первую очередь энергетическими) ресурсами территорий северных морей, покрытых льдом;
- слабой изученностью этих территорий;
- необходимостью научного и практического подтверждения прав Российской Федерации на расширение своей экономической зоны в северных широтах;
- необходимостью гидрографического обеспечения для расширения используемой зоны Северного морского пути и его надежного функционирования;
- перспективностью и целесообразностью коммерческого освоения арктических морских территорий, их охраны и рядом других факторов.

В исследовании, проведенном Боженковым, он раскрывает проблему отсутствия разработанных российских технологий АНПА и дает обзор использования АНПА в развитых западных странах. Он также описывает опыт их использования для картирования территории подо льдом путем отбора проб и подчеркивает тот факт, что в России эти направления не развиты [24]. В выводах Бардачевского и Безсуднова отмечается, что в настоящее время в России наблюдается высокий дефицит специалистов в области разработки АНПА и систем управления для них [25]. В другом исследовании Лаверов и др. отмечают, что Россия отстает от развитых стран в вопросах разведки шельфа и указывают на нехватку ресурсов, технологий и специалистов для проведения сейсморазведочных работ [26].

Постановка задачи. Пусть определена цель создания системы разведки и сопровождения добычи минеральных ресурсов (СРСД МР) в акватории России,

оснащаемая АНПА, обеспечивающая решение задач минерально-сырьевого комплекса России.

В состав СРСД МР могут быть включены полностью или частично существующие организационные структуры, организационно-технические и технические системы, в том числе АНПА, осуществляющие функции непосредственных исполнительных элементов. При необходимости облик этих структур и систем может изменяться. Кроме того, для включения в состав СРСД МР возможно формирование новых организационных структур и разработка новых организационно-технических и технических систем, а также комплексов. Требуется определить облик такой СРСД МР, которая наилучшим образом соответствует поставленной цели в заданных ограничениях.

Математически задача синтеза СРСД МР записывается в следующем виде:

$$V^* = \underset{V \in \{V_o\}}{\text{Arg min}} C(V, U),$$

$$\{V_o\} = \{V : W(V, U) \geq W_{mp},$$

$$R(V, U) \subseteq R\}, \quad (1)$$

где  $C(V, U)$  – функция затрат (расходов в денежном выражении) на создание, содержание и применение будущей СРСД МР, минимальное значение которой соответствует представлениям заказчика о наилучшем варианте СРСД МР  $V^*$ ;

$\{V_o\}$  – множество допустимых вариантов СРСД МР  $V_o$ ;

$W(V, U)$  – показатель эффективности решения задач вариантом СРСД МР  $V$  в условиях  $U$ ;

$W_{mp}$  – требуемая эффективность решения задач СРСД МР;

$R(V, U)$  – ресурс, потребный для создания, содержания и применения варианта СРСД МР  $V$  в условиях  $U$ ;

$R$  – заданные ограничения (энергетические, пространственные, временные и др.) ресурса  $R(V, U)$ , потребные для создания и применения варианта СРСД МР  $V$ .

Непосредственно решить задачу синтеза СРСД МР (1), вследствие ее структурной сложности и большой размерности, практически невозможно. Основным методом решения указанной задачи, как показывает опыт синтеза подобных систем, является метод иерархической декомпозиции задачи по аспектам, уровням и стадиям синтеза. Иерархическая декомпозиция задачи синтеза СРСД МР (1) позволяет не только разукрупнить задачу на основе отношения «целое – часть», но и реализовать «право вмешательства верхнего уровня» и «зависимость верхнего уровня от нижних уровней».

Представим облик СРСД МР в виде совокупности  $V = (V^D, V^S, V^X)$  описаний функций  $V^D$ , структуры  $V^S$  и множества характеристик  $V^X$  СРСД МР, то есть совокупности организационного, функционального, структурного и параметрических обликов СРСД МР.

В зависимости от состояния проработки облика СРСД МР и целей в ходе исследований между аспектами ее синтеза могут устанавливаться различные отношения иерархии. Применительно к случаю, когда верхний уровень занимает организационно-функциональный аспект синтеза СРСД МР (то есть главным процессом является организационно-функциональный синтез), а нижний уровень – технический аспект синтеза, декомпозиция общей задачи синтеза СРСД МР (1) будет иметь вид:

а) задача организационно-функционального синтеза

$$V^{D*} = \mathit{Arg} \min_{V^D \in \{V_\partial^D\}} C(V^D, \tilde{V}^{S*}, \tilde{V}^{X*});$$

$$\{V_\partial^D\} = \{V^D : V^D \in V = (V^D, \tilde{V}^{S*}, \tilde{V}^{X*}), W(V, U) \geq W_{mp}, R(V, U) \subseteq R\}; \quad (2)$$

б) задача системотехнического синтеза

$$V^{S*} = \mathit{Arg} \min_{V^S \in \{V_\partial^S\}} C(\tilde{V}^{D*}, V^S, \tilde{V}^{X*});$$

$$\{V_\partial^S\} = \{V^S : V^S \in V = (\tilde{V}^{D*}, V^S, \tilde{V}^{X*}), W(V, U) \geq W_{mp}, R(V, U) \subseteq R\}; \quad (3)$$

в) задача технического (параметрического) синтеза

$$V^{X*} = \mathit{Arg} \min_{V^X \in \{V_\partial^X\}} C(\tilde{V}^{D*}, \tilde{V}^{S*}, V^X);$$

$$\{V_\partial^X\} = \{V^X : V^X \in V = (\tilde{V}^{D*}, \tilde{V}^{S*}, V^X), W(V, U) \geq W_{mp}, R(V, U) \subseteq R\}, \quad (4)$$

где символ «~» указывает на решения, полученные с предыдущего шага итерации.

Задачи организационно-функционального, системотехнического и технического синтеза (2), (3) и (4) решаются совместно. При невозможности получения приемлемого решения какой-либо одной из этих задач уточняются решения других задач, а также ограничения и условия. Возникающая в результате такого итерационного процесса последовательность решений будет сходиться к варианту  $V^* = (V^{D*}, V^{S*}, V^{X*})$ , являющемуся решением общей задачи синтеза СРСД МР (1).

При этом решением частных задач синтеза по аспектам предварительно ищутся промежуточные варианты  $\{\tilde{V}^*\}^D, \{\tilde{V}^*\}^S, \{\tilde{V}^*\}^X$ , в результате неоднократного циклического перехода от одного аспекта к другому эти решения уточняются, и при получении «устойчивых» множеств  $\{V^*\}^D, \{V^*\}^S, \{V^*\}^X$  итерационный процесс останавливается.

В результате такого сложного поступательно-возвратного движения по видам и внутри каждого вида декомпозиции образуется циклический итерационный процесс с нестационарной иерархической структурой, обеспечивающий постепенное обоснование свойств, характеристик и порядка функционирования будущей СРСД МР и достижение в итоге представлений об ее целесообразном облике.

### **Материалы и методы исследований.**

*Исследований и создание прототипов*

В большинстве случаев для проектирования и испытаний АНПА используются программы автоматизированного проектирования (САПР), инструменты моделирования и физическое прототипирование [27]. Программное обеспечение САПР, такое как AutoCAD и SolidWorks, используется для создания цифровых моделей АНПА и его компонентов. Эти модели можно использовать для визуализации общей конструкции и проверки правильности подгонки всех компонентов. Анализ напряжений и другие моделирования также могут быть выполнены с помощью программного обеспечения САПР, чтобы убедиться, что АНПА спроектирован хорошо и может выдерживать нагрузки подводной среды [28]. Другие инструменты имитационного моделирования, такие как ANSYS и COMSOL, используются для моделирования работы АНПА и его компонентов в различных условиях. Эти инструменты могут моделировать гидродинамические силы, действующие на АНПА, поведение двигательной и рулевой систем, а также работу датчиков приборов [29]. Инструменты моделирования также могут быть использованы для улучшения конструкции АНПА. Например, можно уменьшить сопротивление или повысить эффективность движительной установки [30].

Модель движения АНПА может быть выражена с помощью следующей системы уравнений [31].

1. Уравнение обновления позиции:

$$X(k+1) = X(k) + V(k) \cos(\theta(k)) \cos(\phi(k))T + \delta(k)$$

$$Y(k+1) = Y(k) + V(k) \cos(\theta(k)) \sin(\phi(k))T + \delta(k)$$

$$Z(k+1) = Z(k) + V(k) \sin(\theta(k))T + \delta(k)$$

где  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  - положение АНПА в декартовой системе координат,  $V$  - скорость АНПА,  $\theta$  - угол тангажа,  $\phi$  - угол рысканья,  $T$  - интервал выборки, а  $\delta$  - гауссовский шум.

2. Уравнение обновления скорости:

$$V(k+1) = V(k) + \frac{T}{M} (F(t) - F_d - D \cdot V(k)) + \eta(k)$$

где  $M$  представляет массу АНПА,  $F(t)$  представляет силу тяги,  $F_d$  представляет силу сопротивления,  $D$  представляет коэффициент гидродинамического сопротивления, а  $\eta$  представляет гауссовский шум.

3. Уравнение обновления аттитюдов:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \frac{T}{J_x} (M_y \sin(\phi(k)) - M_z \cos(\phi(k))) + \zeta_1(k)$$

$$\phi(k+1) = \phi(k) + \frac{T}{J_y} (M_x + M_z \sin(\theta(k))) + \zeta_2(k)$$

где  $J_x$  и  $J_y$  представляют моменты инерции относительно осей  $x$  и  $y$ , соответственно,  $M_x$ ,  $M_y$ , и  $M_z$  представляют моменты, создаваемые движителями, а  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$  представляют гауссовский шум.

Эти уравнения представляют движение АНПА в трех измерениях, учитывая его положение, скорость и ориентацию. Система уравнений может быть использована для моделирования поведения АНПА и имитации различных стратегий управления для оптимизации его работы.

Физическое прототипирование предполагает создание физических моделей или прототипов АНПА, которые могут быть использованы для проверки конструкции и тестирования различных компонентов и систем [32]. Прототипирование также может быть выполнено с использованием различных материалов и технологий, таких как 3D-печать, механическая обработка и ручное изготовление. Физические прототипы могут быть использованы для проверки соответствия и функционирования компонентов, а также общей производительности АНПА в воде [33].

*Движительные и рулевые системы*

Движительная и рулевая системы АНПА имеют важное значение для его способности перемещаться по воде и маневрировать в определенных местах [34]. Существует несколько различных типов движителей и систем управления, которые могут быть использованы в АНПА, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Одним из распространенных типов движителей для АНПА является винтовая система, которая состоит из двигателя, редуктора и гребного винта [35]. Двигатель обеспечивает энергию для вращения гребного винта, который создает тягу и двигает АНПА по воде. Редуктор используется для регулировки скорости и крутящего момента двигателя, что позволяет АНПА регулировать свою скорость и маневренность [36]. В зависимости от конкретных требований АНПА гребные системы могут приводиться в движение либо электродвигателями, либо двигателями внутреннего сгорания. Другим типом движительной системы является подруливающая система, которая использует один или несколько небольших двигателей с высоким крутящим моментом для создания тяги [37]. Подруливающие системы обычно используются в небольших АНПА, поскольку они более компактны и эффективны, чем гребные винты. Но они также менее мощные и могут не подойти для больших или более сложных задач.

Системы управления для АНПА могут быть как активными, так и пассивными [2]. Активные системы рулевого управления используют движители или другие средства для управления направлением движения АНПА, в то время как пассивные системы рулевого управления полагаются на форму корпуса или другие внешние силы для направления движения АНПА. Активные системы рулевого управления более точны и позволяют лучше контролировать движение АНПА, но они также требуют больше энергии и могут быть менее энергоэффективными [37]. Пассивные системы рулевого управления проще и энергоэффективнее, но они также менее точны и могут быть менее надежными в сложных или динамичных условиях.

Мощность, необходимая для движения АНПА по воде, в основном определяется тягой, создаваемой его движителями [38, 39]. Для расчета мощности движителей АНПА можно использовать следующую математическую модель:

$$P = F \cdot V$$

где  $P$  - требуемая мощность (в ваттах),  $F$  - тяга, создаваемая движителями (в Ньютонах), а  $V$  - скорость АНПА (в метрах в секунду).

Тяга, создаваемая движителями, может быть рассчитана по следующему уравнению:

$$F = \rho \cdot A \cdot \eta \cdot (n \cdot D)^2$$

где  $\rho$  - плотность воды (в  $\text{кг/м}^3$ ),  $A$  - площадь лопастей движителя (в квадратных метрах),  $\eta$  - эффективность движителя (безразмерная),  $n$  - скорость вращения движителя (в оборотах в секунду),  $D$  - диаметр движителя (в метрах).

Подстановка этого уравнения в уравнение мощности дает:

$$P = \rho \cdot A \cdot \eta \cdot (n \cdot D)^3 \cdot V$$

Эта модель может быть использована для расчета мощности, необходимой для данной конфигурации подруливающего устройства АНПА, с учетом условий эксплуатации, таких как плотность воды и желаемая скорость аппарата.

#### *Датчики и приборы*

АНПА оснащены целым рядом датчиков и приборов для сбора данных и выполнения различных задач. Конкретные датчики и приборы, используемые в АНПА, зависят от сферы применения и требований миссии [40, 41]. В табл. 1 приведены типы датчиков и их применение в АНПА.

**Таблица 1 – Общие типы датчиков, используемых в АНПА / Table 1 – Common types of sensors used in AUVs**

Тип датчика	Описание
<b>Камеры и видеокamеры</b>	Используются для захвата изображений и видео подводной среды, полезны для картографирования и научных исследований.
<b>Сонары</b>	Измеряют расстояния и ориентируют объекты с помощью звуковых волн, полезны для картографирования.
<b>Лидары</b>	Используют лазеры вместо звуковых волн для измерения расстояний и ориентации объектов.
<b>Датчики качества воды</b>	Измеряют параметры, такие как температура, соленость, pH, уровень растворенного кислорода и другие параметры воды.
<b>Навигационные датчики</b>	Используются для определения местоположения и ориентации с помощью GPS, инерциальных измерительных блоков и других приборов.

Помимо датчиков, АНПА могут быть оснащены различными инструментами для выполнения конкретных задач. Например, АНПА могут быть оснащены манипуляторами или устройствами для сбора образцов для выполнения таких задач, как осмотр инфраструктуры или сбор биологических образцов [42, 43]

АНПА также могут быть оснащены системами связи для передачи данных на поверхность или для связи с другими транспортными средствами или платформами [44].

#### *Энергетические системы*

Питание является критически важным моментом при проектировании АНПА, поскольку АНПА должны быть способны работать в течение длительных периодов времени без доступа к внешним источникам питания [7]. Система электропитания АНПА обычно состоит из батареи или другого накопителя энергии, системы управления электропитанием и системы распределения энергии [45].

Накопитель энергии используется для хранения электрической энергии, которая может быть использована для питания различных систем АНПА. Аккумуляторы являются наиболее распространенным типом накопителей энергии, используемых в АНПА, и они бывают разных размеров и химического состава [46]. Выбор батареи зависит от конкретных требований АНПА, таких как потребность в энергии, рабочая глубина и продолжительность миссии [47]. В некоторых приложениях могут использоваться и другие типы накопителей энергии, например, топливные элементы.

Система управления питанием отвечает за регулирование потока электроэнергии от накопителя энергии к различным системам АНПА [48]. Система управления питанием может иметь такие элементы, как преобразователи питания, регуляторы напряжения и автоматические выключатели, чтобы гарантировать, что АНПА всегда будет иметь стабильную подачу электроэнергии. Кроме того, система распределения энергии используется для распределения энергии от накопителя энергии к различным системам АНПА [44]. Система распределения энергии может включать силовые кабели, разъемы и распределительные панели для подключения различных систем АНПА [49].

#### *Система управления*

Система управления АНПА является важным компонентом, который регулирует поведение аппарата и его реакцию на внешние воздействия [16]. Система управления отвечает за поддержание положения аппарата, корректировку его курса и контроль скорости. Система управления состоит из набора программных и аппаратных компонентов, которые работают вместе для обеспечения безопасной и эффективной работы АНПА [50].

Система управления АНПА полагается на ряд датчиков для сбора данных об окружающей среде аппарата, включая его местоположение, ориентацию, глубину и скорость [51, 52, 53]. Эти данные затем обрабатываются бортовым компьютером, который использует алгоритмы для определения оптимального курса действий, основанного на целях миссии аппарата.

Уравнения управления описывают алгоритмы и законы управления, используемые

системой управления АНПА для поддержания положения аппарата, корректировки его курса и контроля скорости. [54]. Эти уравнения могут быть получены из теории управления с обратной связью и обычно представляются в следующем виде:

$$u = K_p * e + K_i * \int e dt + K_d * de/dt$$

где  $u$  - управляющий вход,  $K_p$ ,  $K_i$ , и  $K_d$  - пропорциональный, интегральный и производный коэффициенты усиления,  $e$  - ошибка между желаемым и действительным состояниями, и  $de/dt$  - производная ошибки [55].

Программные компоненты системы управления включают алгоритмы навигации, обхода препятствий и планирования миссии [56, 57, 58]. Эти алгоритмы должны быть оптимизированы для того, чтобы АНПА мог работать в широком диапазоне подводных сред и приспосабливаться к изменяющимся условиям.

Аппаратные компоненты системы управления включают двигатели и рули управления, которые регулируют курс, скорость и глубину движения аппарата [59, 60]. Эти компоненты должны быть рассчитаны на надежную работу в жестких подводных условиях, где такие факторы, как давление, температура и соленость, могут влиять на их работу.

Система управления отвечает за поддержание связи между АНПА и его операторами на поверхности [61]. Эта связь необходима для планирования миссии, передачи данных и дистанционного управления аппаратом [62].

В целом, система управления АНПА является критически важным компонентом, обеспечивающим безопасную и эффективную работу аппарата в широком диапазоне подводных сред. Она опирается на набор программных и аппаратных компонентов, включая датчики, алгоритмы, двигатели и рули управления, для управления поведением аппарата и его реакцией на внешние воздействия.

#### *Проектирование и разработка*

Проектирование и разработка АНПА обычно включает следующие этапы:

##### 1. Определение требований к миссии

Первым шагом в проектировании АНПА является определение требований к миссии.

Она включает в себя определение конкретных целей и задач миссии АНПА, что, в свою очередь, направляет проектирование и разработку аппарата [63]. Ниже перечислены некоторые ключевые факторы, которые учитываются при определении требований к миссии для АНПА:

- **Тип миссии:** Первым шагом в определении требований к миссии является определение типа миссии, которую будет выполнять АНПА. Это может включать широкий спектр задач, таких как океанографические исследования, мониторинг окружающей среды, подводные инспекции или поисково-спасательные операции [64, 65, 66].

- **Максимальная рабочая глубина:** Следующим фактором, который необходимо учитывать, является максимальная рабочая глубина АНПА. Различные АНПА предназначены для работы на разных глубинах, причем некоторые способны погружаться на глубину до нескольких тысяч метров.

- **Грузоподъемность:** Грузоподъемность АНПА - еще один критический фактор, который необходимо учитывать. Это вес оборудования и инструментов, которые способен нести АНПА. Грузоподъемность зависит от конкретных требований миссии.

- **Выносливость:** Выносливость АНПА означает, как долго он может работать под водой, прежде чем его нужно будет извлечь для технического обслуживания или дозаправки. Это важный фактор для миссий, в которых АНПА должен работать в течение длительных периодов времени.

- **Датчики и приборы:** Датчики и приборы, которые несет АНПА, будут варьироваться в зависимости от конкретных требований миссии. Например, АНПА, предназначенный для океанографических исследований, может иметь датчики для измерения температуры воды,

солености и уровня растворенного кислорода, а АНПА, предназначенный для подводных инспекций, может иметь камеры и гидролокационные системы.

- **Связь:** Способность АНПА поддерживать связь с наземной станцией или человеком-оператором также является важным фактором. Это может быть достигнуто с помощью различных средств, включая акустические, спутниковые или радиокommunikационные системы.

## 2. Концептуальный дизайн

После определения требований к миссии следующим шагом является разработка концептуального проекта АНПА [7]. На этом этапе проектная группа разрабатывает высокоуровневую концепцию АНПА, которая служит основой для фаз детального проектирования и создания прототипов. Ниже перечислены некоторые ключевые элементы этапа концептуального проектирования:

- **Двигательная система:** Двигательная система является одним из наиболее важных компонентов АНПА, поскольку она определяет скорость, маневренность и дальность хода аппарата [67]. Существует несколько типов двигательных систем, используемых в АНПА, включая электрические двигатели, гидравлические системы и системы, управляемые плавучестью. На этапе концептуального проектирования выбирается наиболее подходящая двигательная установка для конкретных требований миссии.

- **Форма и размер:** Форма и размер АНПА также являются важными аспектами проектирования. При выборе формы и размера аппарата проектная группа должна учитывать такие факторы, как гидродинамика, плавучесть и устойчивость [68]. АНПА могут иметь разнообразную форму, включая цилиндрическую, сферическую и торпедообразную, в зависимости от требований миссии.

- **Система питания:** Система питания - еще один критический момент при проектировании, поскольку она определяет выносливость и дальность миссии АНПА [46]. Для питания двигателей и сенсорных систем АНПА обычно используют батареи или топливные элементы. На этапе концептуального проектирования необходимо выбрать наиболее подходящую систему питания для конкретных требований миссии.

- **Система управления:** Система управления отвечает за управление движением АНПА и сбор данных. На этапе концептуального проектирования выбирается наиболее подходящая система управления для конкретных требований миссии, которая может включать автономное управление, дистанционное управление или комбинацию обоих вариантов [16].

- **Материалы и компоненты:** Этап концептуального проектирования также включает выбор материалов и компонентов для АНПА. Они могут включать металлы, пластмассы и композиты для корпуса АНПА, а также электронные компоненты и датчики.

## 3. Детальный дизайн

Этап детального проектирования АНПА включает в себя создание комплексного плана проектирования, который включает в себя подробные спецификации для каждого компонента транспортного средства [69]. На этом этапе проектная группа использует концепцию высокого уровня, разработанную на этапе концептуального проектирования, и превращает ее в детальный проект АНПА. Ниже перечислены некоторые ключевые элементы этапа детального проектирования:

- **Механическое проектирование:** Механическая конструкция АНПА включает в себя структурную конструкцию аппарата, а также конструкцию его двигательной, навигационной и управляющей систем [28]. Это включает определение размера, формы и материалов каждого компонента, а также указание механических допусков и требований к производительности.

- **Электрическое проектирование:** Электрическое проектирование АНПА включает в себя проектирование систем питания и связи, а также датчиков и приборов. Это включает в себя определение электрических требований к каждому компоненту, выбор

соответствующего источника питания, а также разработку схем и проводки для АНПА.

- Проектирование программного обеспечения: Проектирование программного обеспечения АНПА включает разработку алгоритмов и систем управления, которые позволят аппарату работать автономно или под дистанционным управлением. Это включает разработку программного обеспечения управления, определение входов и выходов каждого датчика и исполнительного механизма, а также разработку протоколов связи для передачи данных на аппарат и с него.

#### 4. Прототипирование:

Прототипирование — это критически важный этап в разработке АНПА. Этап создания прототипа обычно следует за этапом детального проектирования и включает в себя создание рабочей модели АНПА для тестирования и доработки перед серийным производством.

На этапе создания прототипа проектная группа строит физическую модель АНПА, как правило, с использованием специализированного оборудования и технологий. Прототип может включать все компоненты АНПА, такие как двигательная установка, система управления, датчики и приборы. В качестве альтернативы прототип может быть сосредоточен на конкретных подсистемах или компонентах АНПА, таких как двигательная установка или навигационные датчики.

Основная цель создания прототипа - выявить любые недостатки конструкции или проблемы с производительностью АНПА и доработать конструкцию для повышения ее производительности, надежности и безопасности. Создание прототипа позволяет команде разработчиков испытать АНПА в различных условиях, включая имитацию подводной среды или реальные условия.

Этап создания прототипа может включать несколько итераций, причем каждая итерация направлена на доработку и улучшение конструкции АНПА на основе результатов предыдущих испытаний. Этот итерационный процесс позволяет команде разработчиков доработать конструкцию в соответствии с конкретными требованиями миссии и оптимизировать АНПА для выполнения поставленной задачи.

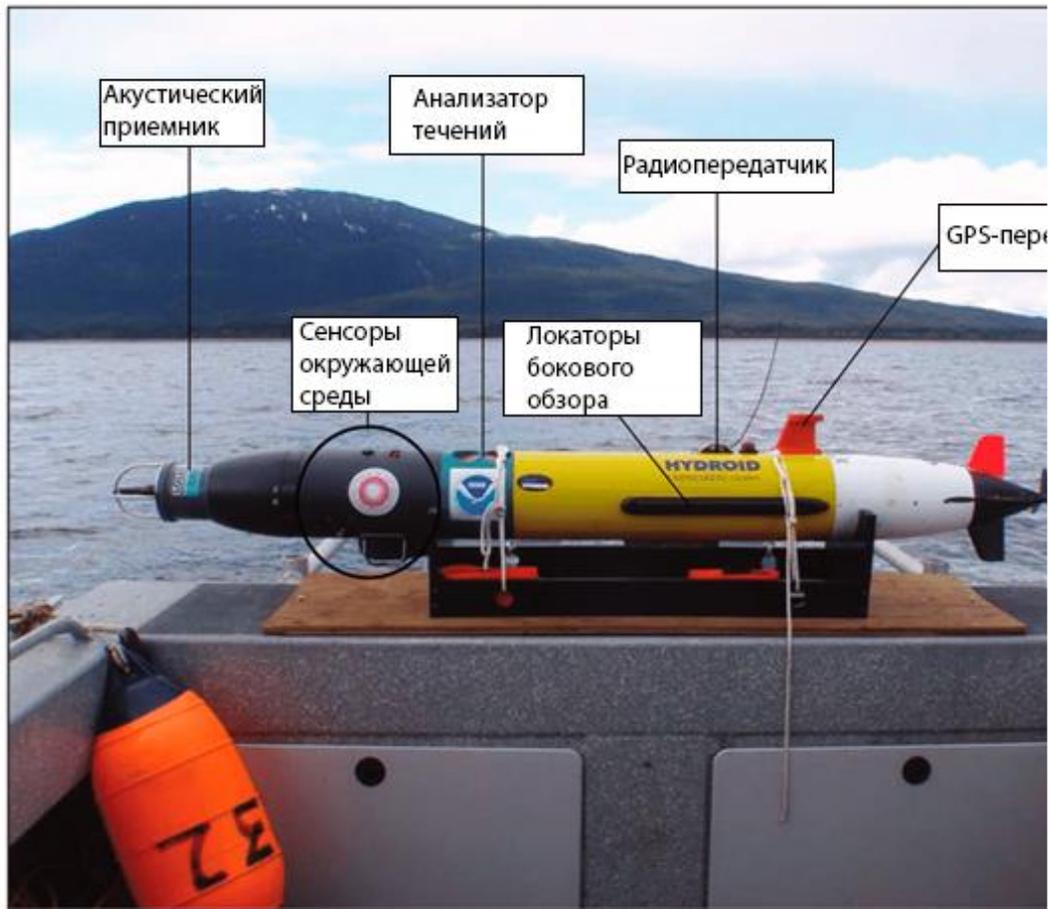
Этап создания прототипов может также включать сотрудничество с внешними партнерами, такими как научно-исследовательские институты, государственные учреждения или частные компании. Такие партнерства могут обеспечить доступ к специализированному оборудованию, опыту и финансированию, что может ускорить процесс создания прототипов и разработки.

#### 5. Тестирование и развертывание

После того как АНПА спроектирован и построен, его необходимо испытать, чтобы убедиться, что он работает в подводной среде так, как задумано. Испытания могут проводиться различными способами, включая:

- Испытание в резервуаре: включает в себя тестирование АНПА в контролируемой среде, такой как резервуар с водой или волновой бассейн, для проверки его работы и выявления любых проблем. Испытания в резервуаре позволяют разработчикам смоделировать различные условия и оценить возможности АНПА без необходимости дорогостоящего развертывания в полевых условиях [70].

- Полевые испытания: они включают в себя тестирование АНПА в реальном океане или другом водоеме, где он будет использоваться. Пример приведен на рис. 2. Полевые испытания позволяют разработчикам проверить работу АНПА в реальных условиях и собрать данные в более реалистичной обстановке. Полевые испытания могут проводиться с судна или с берегового объекта, в зависимости от конкретных требований испытания [68].



**Рисунок 2 – Автономный подводный аппарат (АНПА) REMUS 100, использовавшийся для проведения трекинговых исследований в морских водах вблизи Джуно, Аляска, в 2010 г. / Figure 2 – REMUS 100 Autonomous Underwater Vehicle (ANPA) used for tracking research in marine waters near Juneau, Alaska, in 2010**

Источник: [2]

Source: [2]

- Демонстрационные проекты: это крупномасштабные инициативы по тестированию, которые предполагают развертывание АНПА для конкретной цели, например, для картирования дна океана или мониторинга морской жизни [69]. Демонстрационные проекты могут быть использованы для демонстрации возможностей АНПА и сбора данных для дальнейшего анализа.

После успешного тестирования АНПА его можно развернуть для использования в различных областях. АНПА могут быть развернуты с различных платформ, включая корабли, самолеты или береговые сооружения, в зависимости от конкретных требований миссии [70]. АНПА могут управляться человеком на расстоянии, или они могут быть настроены на самостоятельную работу с использованием заранее запрограммированных маршрутов и алгоритмов.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Проведенное исследование того, как создаются автономные подводные аппараты, позволило сделать ряд важных выводов и выводов. Во-первых, было установлено, что разработка АНПА — это сложный и междисциплинарный процесс, который включает в себя широкий спектр технических и нетехнических факторов. Эти факторы включают в себя дизайн и конфигурацию АНПА, выбор датчиков и двигательных систем, разработку алгоритмов управления и навигации, а также объединение этих систем в единое целое. Во-вторых, было установлено, что разработке АНПА часто мешает ряд проблем и ограничений, включая технические вопросы, связанные с конструкцией и характеристиками АНПА, а также нетехнические вопросы,

такие как финансирование и ресурсы, нормативные и политические соображения, а также необходимость сотрудничества и партнерства. В-третьих, разработка АНПА может быть значительно улучшена за счет использования передовой практики и методов, таких как создание модульных и масштабируемых конструкций, использование аппаратного и программного обеспечения с открытым исходным кодом, определение четких целей и этапов разработки, а также использование гибких методов разработки.

На основании этих выводов можно дать ряд рекомендаций по улучшению разработки АНПА.

- Во-первых, разработчикам АНПА рекомендуется сосредоточиться на создании модульных и масштабируемых конструкций, которые можно легко адаптировать и настраивать для различных приложений и условий. Этого можно добиться за счет использования стандартных интерфейсов и протоколов и применения аппаратного и программного обеспечения с открытым исходным кодом.

- Во-вторых, разработчикам АНПА рекомендуется установить четкие цели и этапы разработки и принять методологию гибкой разработки, которая позволяет проводить быстрые итерации. Это поможет снизить риск дорогостоящих задержек и неудач и обеспечит более эффективный и оперативный процесс разработки.

- В-третьих, разработчикам АНПА рекомендуется искать и устанавливать партнерские отношения и сотрудничество с другими организациями и учреждениями, включая научные круги, промышленность и правительство. Эти партнерства могут помочь обеспечить доступ к ресурсам и опыту, а также ускорить процесс разработки.

- В-четвертых, разработчикам АНПА рекомендуется тесно сотрудничать с регулирующими и политическими органами, чтобы обеспечить соответствие их аппаратов соответствующим нормам и стандартам, а также выступать за создание благоприятной политической среды, способствующей разработке и внедрению АНПА.

**Заключение.** В целом, проведенное исследование процесса разработки АНПА показало сложность междисциплинарный характер этого процесса, а также проблемы и ограничения, которые должны преодолеть разработчики АНПА. Применяя передовые методы и подходы и стремясь к партнерству и сотрудничеству, разработчики АНПА могут значительно улучшить процесс разработки и вывести на рынок новые и инновационные технологии АНПА.

В качестве дополнения необходимо отметить, что оценка экономической эффективности применения АНПА [71, 72] связана не только с технической реализацией [73] и задачами реализуемыми объектами [74, 75], но и местами применения данных аппаратов [76, 77]. Для исследования морских нефтяных и газовых запасов [78, 79] применение специализированных подводных аппаратов экономически обусловлено, тогда как анализ железорудных концентратов практически не производится. Необходимо так же отметить, что в последнее время ведутся разработки гибридных аппаратов, имеющих электрическую и дизельную силовую установку. В данной работе такие аппараты не рассматривались. Отметим только, что в таких установках возможно применение биодизельных топлив [80, 81] получаемых на основе рапсовых культур [82]. В условиях современной экономики [83, 84] такие задачи приобретают все большую актуальность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Carreras M., Palomeras N., Ridaio P., Ribas D. Design of a mission control system for an AUV // *Int J Control*. 2007. Vol. 80. No. 7. P. 993–1007.
2. Eiler J. H., Grothues T. H., Dobarro J. A., Masuda M. M. Comparing Autonomous Underwater Vehicle (AUV) and Vessel-based Tracking Performance for Locating Acoustically Tagged Fish // *Marine Fisheries Review*. 2014. Vol. 75. No. 4. P. 27–42.

3. Hoth J., Kowalczyk W. Determination of Flow Parameters of a Water Flow Around an AUV Body // *Robotics*. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 5.
4. Yokota S., Kim K., Imasato M., Sawada K. Development and sea trial of an Autonomous Underwater Vehicle equipped with a sub-bottom profiler for surveying mineral resources // *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. IEEE, 2016. P. 81–84.
5. Allotta B., Conti R., Costanzi R., Fanelli F. A low cost autonomous underwater vehicle for patrolling and monitoring // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2017. Vol. 231. No. 3. P. 740–749.
6. Brito M. P., Griffiths G., Challenor P. Risk Analysis for Autonomous Underwater Vehicle Operations in Extreme Environments // *Risk Analysis*. 2010. Vol. 30. No. 12. P. 1771–1788.
7. Furlong M. E., McPhail S. D., Stevenson P. A Concept Design for an Ultra-Long-Range Survey Class AUV // *OCEANS 2007 - Europe*. IEEE, 2007. P. 1–6.
8. Yoshida H., Aoki T., Yamamoto I., Tsukioka S., Hyakudome T., Ishibashi S. A working AUV for scientific research // *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No.04CH37600)*. IEEE. P. 863–868.
9. Foster S. D., Hosack G. R., Hill N. A., Barrett N. S. Choosing between strategies for designing surveys: autonomous underwater vehicles // *Methods Ecol Evol*. 2014. Vol. 5. No. 3. P. 287–297.
10. Kukulya A. L., Bellingham J., Kaeli J. W., Reddy C. S., Godin M. A., Conmy R. Development of a propeller driven long range autonomous underwater vehicle (LRAUV) for under-ice mapping of oil spills and environmental hazards: An Arctic Domain Center of Awareness project (ADAC) // *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. IEEE, 2016. P. 95–100.
11. Allotta B., Allotta B., Bartolini F., Pugi L., Costanzi R., Monni N. Preliminary design and fast prototyping of an Autonomous Underwater Vehicle propulsion system // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2015. Vol. 229. No. 3. P. 248–272.
12. Camilli R., Reddy C. M., Yoerger D., Mooy B. V., Jakuba M. V., Kinsey J. C., McIntyre C. P., Sylva S., Maloney J. V. Tracking Hydrocarbon Plume Transport and Biodegradation at Deepwater Horizon // *Science (1979)*. 2010. Vol. 330. No. 6001. P. 201–204.
13. Niu H., Adams S., Kenneth L., Husain T., Bose N. Applications of Autonomous Underwater Vehicles in Offshore Petroleum Industry Environmental Effects Monitoring // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2009. Vol. 48. No. 05. P. 12–16.
14. Wang B., Wan L., Xu Yu., Qin Z. Modeling and simulation of a mini AUV in spatial motion // *Journal of Marine Science and Application*. 2009. Vol. 8, No. 1. P. 7–12.
15. Che G., Yu Z. Neural-network estimators based fault-tolerant tracking control for AUV via ADP with rudders faults and ocean current disturbance // *Neurocomputing*. 2020. Vol. 411. P. 442–454.
16. Ridao P., Yun J., Battle J., Sugihara K. On AUV control architecture // *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)*. IEEE. P. 855–860.
17. Silvestre C., Pascoal A. Control of the INFANTE AUV using gain scheduled static output feedback // *Control Eng Pract*. 2004. Vol. 12. No. 12. P. 1501–1509.
18. Kao M., Weitzel G., Zheng X., Black M. A simple approach to planning and executing complex AUV missions // *Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*. IEEE. 1992. P. 95–102.
19. Sans-Muntadas A., Kelasidi E., Pettersen K. Y., Brekke E. Learning an AUV docking maneuver with a convolutional neural network // *IFAC Journal of Systems and Control*. 2019. Vol. 8. P. 100049.
20. Lapierre L. Robust diving control of an AUV // *Ocean Engineering*. 2009. Vol. 36. No. 1. P. 92–104.
21. Wynn R. B., Huvenne V. A., Bas T. L., Murton B. J., Connelly D. P., Bett B. J., Ruhl H. A., Morris K., Peakall J., Parsons D. R., Sumner E. J., Darby S. E., Dorrell R. M., Hunt J. E. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience // *Mar Geol*. 2014. Vol. 352. P. 451–468.
22. Боженков Ю. А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для

- исследования Арктики и Антарктики // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. P. 47–68.
23. Бардачевский Н. Н., Безсуднов Е. Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2013.
  24. Лаверов Н. П., Дмитриевский А. Н., Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России // *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 1. С. 26-37.
  25. Xiang X., Yu C., Qin Xh., Wilson Ph., Xua G. Manoeuvring-based actuation evaluation of an AUV with control surfaces and through-body thrusters // *Applied Ocean Research*. 2020. Vol. 96. P. 102046.
  26. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир, 1973.
  27. Fadel M., Rabie M., Youssef A. Modeling, Simulation and Control of a Fly-by-wire Flight Control System Using Classical PID and Modified PI-D Controllers // *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2019. Vol. 52, № 3. P. 267–276.
  28. Aguirre F., Vargas S., Valdes D., Tornero J. State of the Art of Parameters for Mechanical Design of an Autonomous Underwater Vehicle // *International Journal of Oceans and Oceanography*. 2017. Vol. 11. No. 1. P. 89–103.
  29. JM K., Sulthan S. M., Ahamed T., Shafeeque K. M. Design and Simulation of Stand-alone DC Microgrid with Energy Storage System // *2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*. IEEE, 2019. P. 1–5.
  30. Ge H., Chen G., Xu G. Multi-AUV Cooperative Target Hunting Based on Improved Potential Field in a Surface-Water Environment // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8. No. 6. P. 973.
  31. Brooks R. A robust layered control system for a mobile robot // *IEEE Journal on Robotics and Automation*. 1986. Vol. 2. No. 1. P. 14–23.
  32. Gao Z., Huang Y., Han J. An alternative paradigm for control system design // *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228)*. IEEE. P. 4578–4585.
  33. Panda J. P., Mitra A., Warrior H. V. A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicles // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2021. Vol. 235, № 1. P. 15–29.
  34. Austin T. C., Stokey R. P., Sharp K. M. Paradigm: a buoy-based system for AUV navigation and tracking // *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158)*. IEEE. P. 935–938.
  35. Gasparoto H. F., Chocron O., Benbouzid M., Meirelles R. S. Magnetic design and analysis of a radial reconfigurable magnetic coupling thruster for vectorial AUV propulsion // *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2017. P. 2876–2881.
  36. Smith R. N., Chao Y., Li P., Caron D. A. Planning and Implementing Trajectories for Autonomous Underwater Vehicles to Track Evolving Ocean Processes Based on Predictions from a Regional Ocean Model // *Int J Rob Res*. 2010. Vol. 29. No. 12. P. 1475–1497.
  37. Roper D. T., Sharma S., Sutton R., Culverhouse P. A review of developments towards biologically inspired propulsion systems for autonomous underwater vehicles // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2011. Vol. 225. No. 2. P. 77–96.
  38. Zong G., Sun H., Nguang S. K. Decentralized Adaptive Neuro-Output Feedback Saturated Control for INS and Its Application to AUV // *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*. 2021. Vol. 32. No. 12. P. 5492–5501.
  39. Zhang T., Chen L., Li Y. AUV Underwater Positioning Algorithm Based on Interactive Assistance of SINS and LBL // *Sensors*. 2015. Vol. 16. No. 1. P. 42.
  40. Yun X., Bachmann E. R., McGhee R. B., Whalen R. H. Testing and evaluation of an integrated GPS/INS system for small AUV navigation // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1999. Vol. 24.

- No. 3. P. 396–404.
41. Eichhorn M., Ament C., Jacobi M., Pfitzenreuter T. Modular AUV System with Integrated Real-Time Water Quality Analysis // *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 6. P. 1837.
  42. Kemna S., Gamilton M. J., Hughes D. T., Lepage K. D. Adaptive autonomous underwater vehicles for littoral surveillance // *Intell Serv Robot*. 2011. Vol. 4. No. 4. P. 245–258.
  43. Khan J., Cho H.-S. A Distributed Data-Gathering Protocol Using AUV in Underwater Sensor Networks // *Sensors*. 2015. Vol. 15. No. 8. P. 19331–19350.
  44. Li D., Du L. AUV Trajectory Tracking Models and Control Strategies: A Review // *J Mar Sci Eng*. 2021. Vol. 9. No. 9. P. 1020.
  45. Hou G., Gong L., Huang C., Zhang J. Novel fuzzy modeling and energy-saving predictive control of coordinated control system in 1000 MW ultra-supercritical unit // *ISA Trans*. 2019. Vol. 86. P. 48–61.
  46. Mendez A., Leo T., Herreros M. Current State of Technology of Fuel Cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles // *Energies (Basel)*. 2014. Vol. 7. No. 7. P. 4676–4693.
  47. Kan T., Mai R., Mercier P. P., Mi C. C. Design and Analysis of a Three-Phase Wireless Charging System for Lightweight Autonomous Underwater Vehicles // *IEEE Trans Power Electron*. 2018. Vol. 33. No. 8. P. 6622–6632.
  48. Petillot Y. R., Antonelli G., Casalino G., Ferreira F. Underwater Robots: From Remotely Operated Vehicles to Intervention-Autonomous Underwater Vehicles // *IEEE Robot Autom Mag*. 2019. Vol. 26. No. 2. P. 94–101.
  49. Wakita N., Hirokawa K., Ichikawa T., Yamauchi Yo. Development of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) for Exploring Deep Sea Marine Mineral Resources. 2010. Vol. 47. No. 3.
  50. Doyle J. Structured uncertainty in control system design // 1985 24th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 1985. P. 260–265.
  51. Jia L., Zhu Z. Improved Fractional-Order Integral Sliding Mode Control for AUV Based on RBF Neural network // 2019 Chinese Automation Congress (CAC). IEEE, 2019. P. 4809–4814.
  52. Ru J., Yu Sh., Wu H., Li Yu. A Multi-AUV Path Planning System Based on the Omni-Directional Sensing Ability // *J Mar Sci Eng*. 2021. Vol. 9. No. 8. P. 806.
  53. Mao Y., Gao F., Zhang Q., Yang Z. An AUV Target-Tracking Method Combining Imitation Learning and Deep Reinforcement Learning // *J Mar Sci Eng*. 2022. Vol. 10. No. 3. P. 383.
  54. Fujii T., Ura T. Development of motion control system for AUV using neural nets // *Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*. IEEE. P. 81–86.
  55. Ang K. H., Chong G., Yun L. PID control system analysis, design, and technology // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559–576.
  56. Tabataba'i-Nasab F. S., Keymasi K. A., Moosavian S. A. A. Adaptive nonlinear control of an autonomous underwater vehicle // *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019. Vol. 41. No. 11. P. 3121–3131.
  57. Wang J., Xu T., Wang Z. Adaptive Robust Unscented Kalman Filter for AUV Acoustic Navigation // *Sensors*. 2019. Vol. 20. No. 1. P. 60.
  58. Klein I., Diamant R. Observability Analysis of DVL/PS Aided INS for a Maneuvering AUV // *Sensors*. 2015. Vol. 15. No. № 10. P. 26818–26837.
  59. Pshikhopov V. Kh., Medvedev M., Gaiduk A. R., Gurenko B. V., et al. Control System Design for Autonomous Underwater Vehicle // 2013 Latin American Robotics Symposium and Competition, Arequipa, Peru. IEEE, 2013. P. 77–82.
  60. Liu L., Wang J., Zhang L., Zhang Sh. Multi-AUV Dynamic Maneuver Countermeasure Algorithm Based on Interval Information Game and Fractional-Order DE // *Fractal and Fractional*. 2022. Vol. 6. No. 5. P. 235.
  61. Liu S., Xu S., Lim Y., Gao L. Visual Navigation for Recovering an AUV by Another AUV in Shallow Water // *Sensors*. 2019. Vol. 19. No. 8. P. 1889.
  62. Xiang X., Jouvencel B., Parodi O. Coordinated Formation Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles for Pipeline Inspection // *Int J Adv Robot Syst*. 2010. Vol. 7. No. 1. P. 3.
  63. Yan Z., Li J., Wu Y., Zhang J. A Real-Time Path Planning Algorithm for AUV in Unknown Underwater Environment Based on Combining PSO and Waypoint Guidance // *Sensors*. 2018. Vol. 19. No. 1. P.

- 20.
64. Yuan C., Licht S., He H. Formation Learning Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles With Heterogeneous Nonlinear Uncertain Dynamics // *IEEE Trans Cybern.* 2018. Vol. 48. No. 10. P. 2920–2934.
  65. Jianya Yu., Wang H., Zhang H., Lin C., Yu D., Li C. AUV Obstacle Avoidance Planning Based on Deep Reinforcement Learning // *J Mar Sci Eng.* 2021. Vol. 9. No. 11. P. 1166.
  66. Sun Y., Ran X., Zhang C., Xu H., Wang X. AUV 3D Path Planning Based on the Improved Hierarchical Deep Q Network // *J Mar Sci Eng.* 2020. Vol. 8. No. 2. P. 145.
  67. Cavallo E., Michelini R. C., Filaretov V. F. Conceptual Design of an AUV Equipped with a Three Degrees of Freedom Vectored Thruster // *J Intell Robot Syst.* 2004. Vol. 39. No. 4. P. 365–391.
  68. Hai H., Zexing Z., Jiyong L., Qirong T. Investigation on the mechanical design and manipulation hydrodynamics for a small sized, single body and streamlined I-AUV // *Ocean Engineering.* 2019. Vol. 186. P. 106106.
  69. Pambudi W. S., Alfianto E., Rachman A., Hapsari D. P. Simulation design of trajectory planning robot manipulator // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics.* 2019. Vol. 8. No. 1. P. 196–205.
  70. Phillips A. B., Turnock S. R., Furlong M. The Use of Computational Fluid Dynamics to Aid Cost-Effective Hydrodynamic Design of Autonomous Underwater Vehicles // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment.* 2010. Vol. 224. No. 4. P. 239–254.
  71. Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic // *Energies (Basel).* 2023. Vol. 16. No. 7. P. 3124.
  72. Marinina O., Nechitailo A., Stroykov G., Tsvetkova A., Reshneva E., Turovskaya L. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas // *Sustainability.* 2023. Vol. 15. No. 12. P. 9614.
  73. Afanaseva O., Bezukhov O., Pervukhin D., Tukeev D. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations // *Inventions.* 2023. Vol. 8. No. 3. P. 71.
  74. Pershin I. M., Papsuh E. G., Kukharova T. V., Utkin V. A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells // *Water (Basel).* 2023. Vol. 15. No. 12. P. 2289.
  75. Katysheva E. G. Application of BigData technology to improve the efficiency of Arctic shelf fields development // *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2021. Vol. 937. No. 4. P. 042080.
  76. Marinina O., Kirsanova N., Nevskaya M. Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework // *Energies (Basel).* 2022. Vol. 15. No. 24. P. 9376.
  77. Katysheva E. Creation of the integrated field model to increase the oil and gas assets management. 2020. P. 153–160.
  78. Marinina O., Tsvetkova A., Vasilev Yu., Komendantova N., Parvenova A. Evaluating the Downstream Development Strategy of Oil Companies: The Case of Rosneft // *Resources.* 2022. Vol. 11. No. 1. P. 4.
  79. Ilyushin Y. V. Development of a Process Control System for the Production of High-Paraffin Oil // *Energies (Basel).* 2022. Vol. 15. No. 17. P. 6462.
  80. Ereemeeva A. M., Kondrasheva M., Khasanov A., Oleynik I. L. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude // *Energies (Basel).* 2023. Vol. 16. No. 5. P. 2121.
  81. Kondrasheva N., Ereemeeva A. Production of biodiesel fuel from vegetable raw materials // *Journal of Mining Institute.* 2023. Vol. 260. P. 248–256.
  82. Ereemeeva A., Kondrasheva N., Nelkenbaum K. Studying the possibility of improving the properties of environmentally friendly diesel fuels // *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues.* CRC Press, 2019. P. 108–113.
  83. Litvinenko V., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V., Naumov I. A., Ratnikov A.

Assessment of the role of the state in the management of mineral resources // Journal of Mining Institute. 2022. Vol. 259. Online first.

84. Bykova E., Khaykin M., Shabaeyva Yu., Beloborodva M. Development of methodology for economic evaluation of land plots for the extraction and processing of solid minerals // Journal of Mining Institute. 2023. Vol. 259. P. 52–67.

#### REFERENCES

1. Carreras M, Palomeras N, Ridao P, Ribas D. Design of a mission control system for an AUV. *Int J Control*. 2007;80(7):993-1007.
2. Eiler JH, Grothues TH, Dobarro JA, Masuda MM. Comparing Autonomous Underwater Vehicle (AUV) and Vessel-based Tracking Performance for Locating Acoustically Tagged Fish. *Marine Fisheries Review*. 2014;75(4):27-42.
3. Hoth J, Kowalczyk W. Determination of Flow Parameters of a Water Flow Around an AUV Body. *Robotics*. 2019;8(1):5.
4. Yokota S, Kim K, Imasato M, Sawada K. Development and sea trial of an Autonomous Underwater Vehicle equipped with a sub-bottom profiler for surveying mineral resources. 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). IEEE; 2016;81-84.
5. Allotta B, Conti R, Costanzi R, Fanelli F. A low cost autonomous underwater vehicle for patrolling and monitoring. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2017;231(3):740-749.
6. Brito MP, Griffiths G, Challenor P. Risk Analysis for Autonomous Underwater Vehicle Operations in Extreme Environments. *Risk Analysis*. 2010;30(12):1771-1788.
7. Furlong ME, McPhail SD, Stevenson P. A Concept Design for an Ultra-Long-Range Survey Class AUV. *OCEANS 2007 - Europe*. IEEE; 2007;1-6.
8. Yoshida H, Aoki T, Yamamoto I, Tsukioka S, et al. A working AUV for scientific research. *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No.04CH37600)*. IEEE; 2004;863-868.
9. Foster SD, Hosack GR, Hill NA, Barrett NS. Choosing between strategies for designing surveys: autonomous underwater vehicles. *Methods Ecol Evol*. 2014;5(3):287-297.
10. Kukulya AL, Bellingham J, Kaeli JW, Reddy CS, et al. Development of a propeller driven long range autonomous underwater vehicle (LRAUV) for under-ice mapping of oil spills and environmental hazards: An Arctic Domain Center of Awareness project (ADAC). In *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. IEEE, 2016. P. 95–100.
11. Allotta B, Allotta B, Bartolini F, Pugi L, et al. Preliminary design and fast prototyping of an Autonomous Underwater Vehicle propulsion system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2015;229(3):248-272.
12. Camilli R, Reddy CM, Yoerger D, Mooy BV, et al. Tracking Hydrocarbon Plume Transport and Biodegradation at Deepwater Horizon. *Science (1979)*. 2010;330(6001):201-204.
13. Niu H, Adams S, Kenneth L, Husain T, et al. Applications of Autonomous Underwater Vehicles in Offshore Petroleum Industry Environmental Effects Monitoring. *Journal of Canadian Petroleum Technology*. 2009;48(05):12-16.
14. Wang B, Wan L, Xu Yu, Qin Z. Modeling and simulation of a mini AUV in spatial motion. *Journal of Marine Science and Application*. 2009;8(1):7-12.
15. Che G, Yu Z. Neural-network estimators based fault-tolerant tracking control for AUV via ADP with rudders faults and ocean current disturbance. *Neurocomputing*. 2020;411:442-454.
16. Ridao P, Yun J, Battle J, Sugihara K. On AUV control architecture. In *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)*. IEEE; 2000;855-860.
17. Silvestre C, Pascoal A. Control of the INFANTE AUV using gain scheduled static output feedback. *Control Eng Pract*. 2004;12(12):1501-1509.
18. Kao M, Weitzel G, Zheng X, Black M. A simple approach to planning and executing complex AUV missions. *Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*. IEEE; 1992;95-102.

19. Sans-Muntadas A, Kelasidi E, Pettersen KY, Brekke E. Learning an AUV docking maneuver with a convolutional neural network. *IFAC Journal of Systems and Control*. 2019;8:100049.
20. Lapiere L. Robust diving control of an AUV. *Ocean Engineering*. 2009;36(1):92-104.
21. Wynn RB, Huvenne VA, Bas TL, Murton BJ, et al. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. *Mar Geol*. 2014;352:451-468.
22. Bozhenov YuA. Use of Autonomous Unmanned Underwater Vehicles for Arctic and Antarctic Research. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2011;47-68. (In Russ.).
23. Bardachevsky NN, Bezsudnov EYu. Status and Prospects of Unmanned Underwater Vehicles Application in Hydrographic Research and Underwater Navigation. *Inter Expo Geo-Siberia*. 2013. (In Russ.).
24. Laverov NP, Dmitrievsky AN, Bogoyavlensky VI. Fundamental Aspects of Oil and Gas Resource Development on the Russian Arctic Shelf. *Arctic: Ecology and Economics*. 2011;(1):26-37. (In Russ.).
25. Xiang X, Yu C, Qin Xh, Wilson Ph, et al. Manoeuvring-based actuation evaluation of an AUV with control surfaces and through-body thrusters. *Applied Ocean Research*. 2020;96:102046.
26. Mesarovich M, Mako D, Takahara I. *Theory of hierarchical multilevel systems*. Moscow: Mir; 1973. (In Russ.).
27. Fadel M, Rabie M, Youssef A. Modeling, Simulation and Control of a Fly-by-wire Flight Control System Using Classical PID and Modified PI-D Controllers. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. 2019;52(3):267-276.
28. Aguirre F, Vargas S, Valdes D, Tornero J. State of the Art of Parameters for Mechanical Design of an Autonomous Underwater Vehicle. *International Journal of Oceans and Oceanography*. 2017;11(1):89-103.
29. JM K, Sulthan SM, Ahamed T, Shafeeque KM. Design and Simulation of Stand-alone DC Microgrid with Energy Storage System. In *2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*. IEEE; 2019;1-5.
30. Ge H, Chen G, Xu G. Multi-AUV Cooperative Target Hunting Based on Improved Potential Field in a Surface-Water Environment. *Applied Sciences*. 2018;8(6):973.
31. Brooks R. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*. 1986;2(1):14-23.
32. Gao Z, Huang Y, Han J. An alternative paradigm for control system design. In *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.01CH37228)*. IEEE; 2001;4578-4585.
33. Panda JP, Mitra A, Warrior HV. A review on the hydrodynamic characteristics of autonomous underwater vehicle. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2021;235(1):15-29.
34. Austin TC, Stokey RP, Sharp KM. Paradigm: a buoy-based system for AUV navigation and tracking. *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*. In *Conference Proceedings (Cat. No.00CH37158)*. IEEE; 2000:935-938.
35. Gasparoto HF, Chocron O, Benbouzid M, Meirelles RS. Magnetic design and analysis of a radial reconfigurable magnetic coupling thruster for vectorial AUV propulsion. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE; 2017;2876-2881.
36. Smith RN, Chao Y, Li P, Caron DA. Planning and Implementing Trajectories for Autonomous Underwater Vehicles to Track Evolving Ocean Processes Based on Predictions from a Regional Ocean Model. *Int J Rob Res*. 2010;29(12):1475-1497.
37. Roper DT, Sharma S, Sutton R, Culverhouse P. A review of developments towards biologically inspired propulsion systems for autonomous underwater vehicles. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2011;225(2):77-96.
38. Zong G, Sun H, Nguang SK. Decentralized Adaptive Neuro-Output Feedback Saturated Control for INS and Its Application to AUV. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*. 2021;32(12):5492-5501.

39. Zhang T, Chen L, Li Y. AUV Underwater Positioning Algorithm Based on Interactive Assistance of SINS and LBL. *Sensors*. 2015;16(1):42.
40. Yun X, Bachmann ER, McGhee RB, Whalen RH. Testing and evaluation of an integrated GPS/INS system for small AUV navigation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1999;24(3):396-404.
41. Eichhorn M, Ament C, Jacobi M, Pfutzenreuter T. Modular AUV System with Integrated Real-Time Water Quality Analysis. *Sensors*. 2018;18(5):1837.
42. Kemna S, Gamilton MJ, Hughes DT, Lepage KD. Adaptive autonomous underwater vehicles for littoral surveillance. *Intell Serv Robot*. 2011;4(4):245-258.
43. Khan J, Cho H.-S. A Distributed Data-Gathering Protocol Using AUV in Underwater Sensor Networks. *Sensors*. 2015;15(8):19331-19350.
44. Li D, Du L. AUV Trajectory Tracking Models and Control Strategies: A Review. *J Mar Sci Eng*. 2021;9(9):1020.
45. Hou G, Gong L, Huang C, Zhang J. Novel fuzzy modeling and energy-saving predictive control of coordinated control system in 1000 MW ultra-supercritical unit. *ISA Trans*. 2019;86:48-61.
46. Mendez A, Leo T, Herreros M. Current State of Technology of Fuel Cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles. *Energies (Basel)*. 2014;7(7):4676-4693.
47. Kan T, Mai R, Mercier PP, Mi CC. Design and Analysis of a Three-Phase Wireless Charging System for Lightweight Autonomous Underwater Vehicles. In *IEEE Trans Power Electron*. 2018;33(8):6622-6632.
48. Petillot YR, Antonelli G, Casalino G, Ferreira F. Underwater Robots: From Remotely Operated Vehicles to Intervention-Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE Robot Autom Mag*. 2019;26(2):94-101.
49. Wakita N, Hirokawa K, Ichikawa T, Yamauchi Yo. Development of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) for Exploring Deep Sea Marine Mineral Resources. 2010;47(3).
50. Doyle J. Structured uncertainty in control system design. In 1985 24th IEEE Conference on Decision and Control. *IEEE*; 1985;260-265.
51. Jia L, Zhu Z. Improved Fractional-Order Integral Sliding Mode Control for AUV Based on RBF Neural network. 2019 Chinese Automation Congress (CAC). *IEEE*; 2019;4809-4814.
52. Ru J, Yu Sh, Wu H, Li Yu. A Multi-AUV Path Planning System Based on the Omni-Directional Sensing Ability. *J Mar Sci Eng*. 2021;9(8):806.
53. Mao Y, Gao F, Zhang Q, Yang Z. An AUV Target-Tracking Method Combining Imitation Learning and Deep Reinforcement Learning. *J Mar Sci Eng*. 2022;10(3):383.
54. Fujii T, Ura T. Development of motion control system for AUV using neural nets. *Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*. *IEEE*; 1990;81-86.
55. Ang KH, Chong G, Yun L. PID control system analysis, design, and technology // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005;13(4):559-576.
56. Tabataba'i-Nasab FS, Keymasi KA, Moosavian SAA. Adaptive nonlinear control of an autonomous underwater vehicle. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2019;41(11):3121-3131.
57. Wang J, Xu T, Wang Z. Adaptive Robust Unscented Kalman Filter for AUV Acoustic Navigation. *Sensors*. 2019;20(1):60.
58. Klein I, Diamant R. Observability Analysis of DVL/PS Aided INS for a Maneuvering AUV. *Sensors*. 2015;15(10):26818-26837.
59. Pshikhopov VKh, Medvedev M, Gaiduk AR, Gurenko BV. Control System Design for Autonomous Underwater Vehicle. In 2013 Latin American Robotics Symposium and Competition, Arequipa, Peru. *IEEE*; 2013;77-82.
60. Liu L, Wang J, Zhang L, Zhang Sh. Multi-AUV Dynamic Maneuver Countermeasure Algorithm Based on Interval Information Game and Fractional-Order DE. *Fractal and Fractional*. 2022;6(5):235.
61. Liu S, Xu S, Lim Y, Gao L. Visual Navigation for Recovering an AUV by Another AUV in Shallow Water. *Sensors*. 2019;19(8):1889.
62. Xiang X, Jouvencel B, Parodi O. Coordinated Formation Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles for Pipeline Inspection. *Int J Adv Robot Syst*. 2010;7(1):3.

63. Yan Z, Li J, Wu Y, Zhang J. A Real-Time Path Planning Algorithm for AUV in Unknown Underwater Environment Based on Combining PSO and Waypoint Guidance. *Sensors*. 2018;19(1):20.
64. Yuan C, Licht S, He H. Formation Learning Control of Multiple Autonomous Underwater Vehicles With Heterogeneous Nonlinear Uncertain Dynamics. *IEEE Trans Cybern*. 2018;48(10):2920-2934.
65. Jianya Yu, Wang H, Zhang H, Lin C, et al. AUV Obstacle Avoidance Planning Based on Deep Reinforcement Learning. *J Mar Sci Eng*. 2021;9(11):1166.
66. Sun Y, Ran X, Zhang C, Xu H, et al. AUV 3D Path Planning Based on the Improved Hierarchical Deep Q Network. *J Mar Sci Eng*. 2020;8(2):145.
67. Cavallo E, Michellini RC, Filaretov VF. Conceptual Design of an AUV Equipped with a Three Degrees of Freedom Vectored Thruster. *J Intell Robot Syst*. 2004;39(4):365-391.
68. Hai H, Zexing Z, Jiyong L, Qirong T. Investigation on the mechanical design and manipulation hydrodynamics for a small sized, single body and streamlined I-AUV. *Ocean Engineering*. 2019;186:106106.
69. Pambudi WS, Alfianto E, Rachman A, Hapsari DP. Simulation design of trajectory planning robot manipulator. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2019;8(1):196-205.
70. Phillips AB, Turnock SR, Furlong M. The Use of Computational Fluid Dynamics to Aid Cost-Effective Hydrodynamic Design of Autonomous Underwater Vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2010;224(4):239-254.
71. Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic. *Energies (Basel)*. 2023;16(7):3124.
72. Marinina O, Nechitailo A, Stroykov G, Tsvetkova A, et al. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas. *Sustainability*. 2023;15(12):9614.
73. Afanaseva O, Bezukhov O, Pervukhin D, Tukeev D. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations. *Inventions*. 2023;8(3):71.
74. Pershin IM, Papsuh EG, Kukharova TV, Utkin VA. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. *Water (Basel)*. 2023;15(12):2289.
75. Katysheva EG. Application of BigData technology to improve the efficiency of Arctic shelf fields development. In *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 2021;937(4):042080.
76. Marinina O, Kirsanova N, Nevskaya M. Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework. *Energies (Basel)*. 2022;15(24):9376.
77. Katysheva E. Creation of the integrated field model to increase the oil and gas assets management. 2020;153-160.
78. Marinina O, Tsvetkova A, Vasilev Yu, Komendantova N, et al. Evaluating the Downstream Development Strategy of Oil Companies: The Case of Rosneft. *Resources*. 2022;11(1):4.
79. Ilyushin YV. Development of a Process Control System for the Production of High-Paraffin Oil. *Energies (Basel)*. 2022;15(17):6462.
80. Ereemeeva AM, Kondrasheva M, Khasanov A, Oleynik IL. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude. *Energies (Basel)*. 2023;16(5):2121.
81. Kondrasheva N, Ereemeeva A. Production of biodiesel fuel from vegetable raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:248-256.
82. Ereemeeva A, Kondrasheva N, Nelkenbaum K. Studying the possibility of improving the properties of environmentally friendly diesel fuels. In *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. CRC Press; 2019;108-113.
83. Litvinenko V, Petrov EI, Vasilevskaya DV, Yakovenko AV, et al. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2022;259. Online first.
84. Bykova E, Khaykin M, Shabaeyva Yu, Beloboroodva M. Development of methodology for economic evaluation of land plots for the extraction and processing of solid minerals. *Journal of Mining Institute*.

2023;259:52-67.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дмитрий Анатольевич Первухин** – доктор технических наук, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, [pervuchin@rambler.ru](mailto:pervuchin@rambler.ru)

**Дмитрий Дмитриевич Котов** – аспирант 3 курса, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, [dmk.kotov@gmail.com](mailto:dmk.kotov@gmail.com)

**Юрий Марсович Искандеров** – доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, [iskanderov.y@ias.spb.su](mailto:iskanderov.y@ias.spb.su)

**Вклад авторов:** все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 12.01.2025;

одобрена после рецензирования: 26.03.2025;

принята к публикации: 04.04.2025.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dmitry A. Pervukhin** – Dr. Sci. (Techn.), Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, [pervuchin@rambler.ru](mailto:pervuchin@rambler.ru)

**Dmitry D. Kotov** – 3rd year Postgraduate Student, Saint Petersburg Mining University of Empress Catherine II, [dmk.kotov@gmail.com](mailto:dmk.kotov@gmail.com)

**Yuri M. Iskanderov** – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, [iskanderov.y@ias.spb.su](mailto:iskanderov.y@ias.spb.su)

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted: 12.01.2025;

approved after reviewing: 26.03.2025;

accepted for publication: 04.04.2025.