

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Котов Дмитрий Дмитриевич



МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ИНТЕРЕСАХ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО
КОМПЛЕКСА

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Первухин Д.А.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЗАДАЧ, РЕШАЕМЫХ АВТОНОМНЫМИ НЕОБИТАЕМЫМИ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ, СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ	10
1.1 Анализ задач, решаемых в морских и океанических акваториях России для минерально-сырьевого комплекса	10
1.2 Анализ современных методов решения задач МСК в морских акваториях: технологии, опыт и перспективы	12
1.2.1 Обзор существующих средств и технологий, применяемых в морских акваториях России.....	12
1.2.2 Стратегии геологоразведки и добычи в морских акваториях.....	13
1.2.3 Мониторинг и экологический контроль в морских операциях	15
1.2.4 Эффективность технологий и перспективы их модернизации.....	16
1.3 Оценка современных и перспективных АНПА: состояние и потенциал для решения задач в интересах МСК.....	17
1.4 Сравнительная оценка традиционных и роботизированных средств и методов решения задач МСК в морских акваториях	21
1.4.1 Точность и эффективность картирования	22
1.4.2 Экономическая эффективность	22
1.4.3 Экологические преимущества	23
1.4.4 Повышение безопасности морских операций	23
1.4.5 Технические ограничения и перспективы развития	24
1.5 Анализ состояния и тенденций развития систем управления АНПА и их функциональных возможностей для решения задач МСК.....	24
1.6 Оценка существующих методов и алгоритмов информационного обеспечения функционирования АНПА	27
1.7 Выводы по главе 1.....	30
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ИНТЕРЕСАХ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА	32
2.1 Разработка возможных сценариев функционирования АНПА при решении задач в интересах минерально-сырьевого комплекса.....	32

2.2 Структура модели.....	35
2.2.1 Возмущающие воздействия на АНПА	38
2.2.2 Внутренние параметры	40
2.2.3 Внешние факторы и окружающая среда	52
2.2.4 Управляющие воздействия.....	56
2.2.5 Выходные параметры	57
2.3 Обоснование значимых параметров АНПА	59
2.4 Построение концептуальной модели АНПА	72
2.5 Математическая модель пространственного движения АНПА.....	76
2.6 Выводы по главе 2.....	78
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА	80
3.1 Обоснование функциональных требований к информационно-управляющей системе АНПА	80
3.2 Построение иерархической структуры свойств информационно-управляющей системы АНПА	84
3.3 Структурно-параметрический синтез рациональных вариантов информационно- управляющей системы АНПА	84
3.4 Структурно-параметрический синтез рациональных вариантов информационно- управляющей системы АНПА	84
3.5 Обоснование критериев принятия решений по выбору оптимального варианта построения информационно-управляющей системы АНПА	93
3.6 Выбор оптимального варианта построения информационно-управляющей системы АНПА и его оценка по совокупности единичных, комплексных и интегральных качественных и количественных показателей	94
3.7 Выводы по главе 3.....	95
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОЗДАНИЮ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ИНТЕРЕСАХ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА	97
4.1 Разработка математической модели и критериев оценки эффективности функционирования информационно-управляющей системы АНПА	97

4.1.1 Анализ уровней управления ИУС	97
4.1.2 Обоснование принимаемых ограничений и допущений	98
4.1.3 Разработка математической модели АНПА как объекта управления.....	99
4.2 Разработка имитационной модели функционирования информационно-управляющей системы АНПА в среде MATLAB/SIMULINK	103
4.3 Разработка системы информационного обеспечения АНПА	105
4.3.1 Разработка системы управления АНПА	109
4.4 Оценка устойчивости и качества управления АНПА при решении задач в интересах минерально-сырьевого комплекса.....	110
4.5 Разработка практических рекомендаций по внедрению схемных, технических, технологических и аппаратно-программных решений информационно-управляющей системы АНПА, обеспечивающей качественное и эффективное решение задач в интересах минерально-сырьевого комплекса в морских и океанских акваториях России.....	119
4.6 Выводы по главе 4.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения.....	133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Актуальность диссертационного исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности геологоразведочных и инспекционных работ минерально-сырьевого комплекса (МСК) на российском континентальном шельфе, в Мировом океане, Арктике. Традиционные методы, используемые сегодня, ограничены в точности, автономности и рентабельности при работе в условиях Арктики, сложного климата, ледовой обстановки и удалённости от инфраструктуры. Решение задач МСК в морских акваториях требует новых подходов, один из которых базируется на применении автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащаемых современными информационно-управляющими системами (ИУС).

Степень разработанности темы исследования

Разработке АНПА и систем управления (СУ) ими посвящены исследования многих отечественных и зарубежных авторов. Существенный вклад в развитие технологий и методов использования АНПА внесли работы Д.В. Войтова, В.К. Пшихопова, М.Ю. Медведева, А.Р. Гайдука, А.А. Борейко, В.Е. Горнака, С.В. Мальцевой, Д.Г. Ляхова, С.В. Смирнова, М.И. Чудакова, А. В. Боженова, Е. Д. Безсуднова, В. Г. Бардачевского, Н. П. Лавёрова, а также зарубежных учёных и специалистов, таких как D. Yoerger, H. Singh, B. Jalving, J. Leonard, и компаний Kongsberg Maritime, Bluefin Robotics, Fugro, MBARI и других. В этих исследованиях рассмотрены вопросы конструирования аппаратов, методы навигации, алгоритмы обработки данных и основы автономного управления, однако основной акцент сделан на технических аспектах реализации отдельных задач без комплексного учёта специфики применения АНПА в МСК.

Вместе с тем, остаются недостаточно проработанными вопросы, связанные с интеллектуализацией систем управления АНПА для комплексного выполнения задач МСК, особенно в условиях подлёдных исследований и глубоководных операций на российском континентальном шельфе. Отсутствует целостная концепция ИУС АНПА, учитывающая специфику российского континентального шельфа, Мирового океана и Арктики, что является существенным пробелом в существующих исследованиях.

Объект исследования

Объектом исследования является ИУС АНПА, решающая задачи МСК при выполнении геологоразведочных и инспекционных работ на российском континентальном шельфе, в Мировом океане, Арктике.

Предмет исследования

Предметом исследования являются методы анализа, синтеза, структура и алгоритмы функционирования ИУС АНПА, предназначенных для решения задач МСК на российском континентальном шельфе, в Мировом океане, Арктике

Идея работы заключается в применении ИУС АНПА, спроектированной с помощью моделирования и структурно-параметрического синтеза для решения задач МСК

Цель исследования

Разработка методологии построения и применения специализированных ИУС АНПА для повышения эффективности решения задач минерально-сырьевого комплекса в сложных условиях эксплуатации.

Основные задачи исследования

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе планируется решить следующие **задачи**.

1. Провести сравнительный анализ существующих отечественных и зарубежных технологий и методов информационного обеспечения и управления АНПА, выявить их преимущества, недостатки и области ограниченного применения.

2. Выполнить системный анализ требований к ИУС АНПА при решении геологоразведочных и инспекционных задач на российском континентальном шельфе, в Мировом океане, Арктике

3. Разработать концептуальную модель ИУС АНПА, учитывающую специфику применения аппаратов в труднодоступных, подлёдных и глубоководных районах, характерных для условий решения задач минерально-сырьевого комплекса.

4. Обосновать и предложить методы и алгоритмы навигации, адаптивного планирования маршрутов и автономного принятия решений в условиях ограниченной связи с оператором и неопределённости внешней среды.

5. Разработать имитационную модель ИУС, провести её экспериментальную апробацию и оценить эффективность предложенных решений в типовых сценариях функционирования АНПА при решении задач в интересах МСК.

Научная новизна результатов исследования состоит в обосновании и установлении особенностей функционирования ИУС АНПА, ориентированных специально на решение задач МСК России, в отличие от традиционно используемых унифицированных решений. Сформированы требования к ИУС АНПА, обусловленные задачами МСК. Рассмотрены рациональные варианты структуры ИУС АНПА. Впервые выявлены зависимости между

спецификой задач МСК и структурно-параметрическими характеристиками специализированных ИУС АНПА.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.1:

п.3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

п.7. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана и рекомендована к применению концептуальная модель ИУС АНПА, обеспечивающая повышение эффективности задач МСК России;

2. Предложен и рекомендован к использованию метод структурно-параметрического синтеза ИУС АНПА, позволяющий оптимально выбирать и обосновывать состав компонентов и их технические характеристики на стадии проектирования, обеспечивающий повышение надёжности и эффективности автономных операций при выполнении задач МСК;

3. Разработаны алгоритмы и схемотехнические решения информационного обеспечения автономной навигации и адаптивного планирования миссий АНПА, внедрение которых позволяет расширить область применения аппаратов и повысить точность геолого-геофизических измерений и оперативность инспекционных работ;

4. Выполнена оценка эффективности предложенных решений на основе имитационного моделирования типовых сценариев функционирования АНПА, подтверждающая целесообразность применения разработанной ИУС для решения практических задач МСК России.

5. Результаты диссертационных исследований реализованы при выполнении составной части научно-исследовательской работы в Михайловской военной артиллерийской академии; акт внедрения от 16.01.2025 (Приложение Б).

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использован комплексный подход, включающий обобщение и системный анализ опыта отечественных и зарубежных исследований в области ИУС АНПА. В работе применены методы структурного и параметрического синтеза, сравнительного сопоставления технических решений, математического моделирования и анализа эффективности технологических процессов. Разработана методика структурно-параметрического синтеза ИУС АНПА, которая позволяют

обосновывать и рационально выбирать технические характеристики, компоненты СУ, структуру, функции и параметры с учётом специфики задач МСК России.

Экспериментальная часть исследования базировалась на использовании методов компьютерного моделирования, планирования и проведения имитационных экспериментов, реализованных в программной среде MATLAB/Simulink с применением специализированных библиотек. Это позволило проверить ИУС АНПА в условиях, максимально приближенных к реальным сценариям использования аппаратов. Результаты моделирования подтвердили практическую значимость и реализуемость разработанных методов и рекомендаций для проектирования и применения современных ИУС АНПА, предназначенных для решения задач МСК.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанная концептуальная модель информационно-управляющей системы АНПА является основой для проектирования систем, предназначенных для решения задач в интересах минерально-сырьевого комплекса.

2. Предложенный метод структурно-параметрического синтеза создаёт научно-методическую основу для разработки информационно-управляющей системы АНПА, решающей задачи минерально-сырьевого комплекса в морских акваториях.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена: комплексным анализом предметной области, корректным использованием общепризнанных теорий, методов системного исследования, применением стандартных и апробированных методов математического и имитационного моделирования, использованием современных программных комплексов (MATLAB/Simulink) для проведения численных экспериментов и обработки результатов, а также сравнением полученных результатов с данными, представленными другими авторами и опубликованными в научных источниках. Достоверность подтверждена выполнением значительного объёма имитационных экспериментов, воспроизводящих реальные сценарии эксплуатации АНПА, а также практическим внедрением разработанных методик в проектирование ИУС АНПА, что демонстрирует их объективность и применимость в решении актуальных задач минерально-сырьевого комплекса. Результаты моделирования показали статическую сходимость и показали корреляцию с данными натурных экспериментов, что подтверждает адекватность моделей.

Апробация результатов

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих международных научных и научно-практических конференциях:

1. Конференции «XIII Международная научная конференция «Транспортная инфраструктура для устойчивого развития регионов»» (октябрь 2022 г., г. Красноярск),

2. Конференции «Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (ноябрь 2022 г., г. Санкт-Петербург),

3. Конференции «VIII Международная научная конференция «MANAGEMENT, ECONOMICS, ETHICS, TECHNICS – MEET 2022» (октябрь 2022 г., г. Санкт-Петербург),

4. Конференции «VI Международная научно-исследовательская конференция «Наука. Технологии. Общество» (ноябрь 2022 г., г. Саратов).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; проведении анализа и обобщения зарубежной и отечественной научно-технической литературы по теме исследования; разработке концептуальной модели интеллектуальной информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата; создании метода структурно-параметрического синтеза компонентов ИУС АНПА; разработке алгоритмов автономной навигации, адаптивного планирования и оперативного принятия решений; реализации и апробации имитационной модели предложенных решений, а также в формулировке выводов и рекомендаций, имеющих практическое значение для минерально-сырьевого комплекса России. Научные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах (пункты списка литературы (11, 22, 50, 60), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus/WoS. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложение А)».

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка, содержит 133 страницы машинописного текста, 42 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 77 наименований и 2 приложения на 2 страницах.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЗАДАЧ, РЕШАЕМЫХ АВТОНОМНЫМИ НЕОБИТАЕМЫМИ ПОДВОДНЫМИ АППАРАТАМИ, СОСТОЯНИЯ И ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

1.1 Анализ задач, решаемых в морских и океанических акваториях России для минерально-сырьевого комплекса

Минерально-сырьевой комплекс России в значительной мере зависит от освоения морских месторождений нефти, газа и других полезных ископаемых. По оценкам, вклад минерально-сырьевой базы в ВВП России в долгосрочной перспективе будет не менее 10%, в том числе за счёт устойчивого развития энергетического сектора [65]. Для обеспечения этого роста необходимы эффективные решения ряда ключевых задач в морских и океанических акваториях. Одной из острых проблем отрасли является недостаточная геологическая изученность территории России и её континентального шельфа [14]. В соответствии с государственной программой «Воспроизводство и использование природных ресурсов» поставлены цели ежегодно увеличивать детальность геологического исследования территории РФ и шельфа не менее чем на 7%, а объёмы поисково-разведочных работ на перспективных акваториях – не менее чем на 5% в год [18]. Цели развития МСК представлены на рисунке 1.

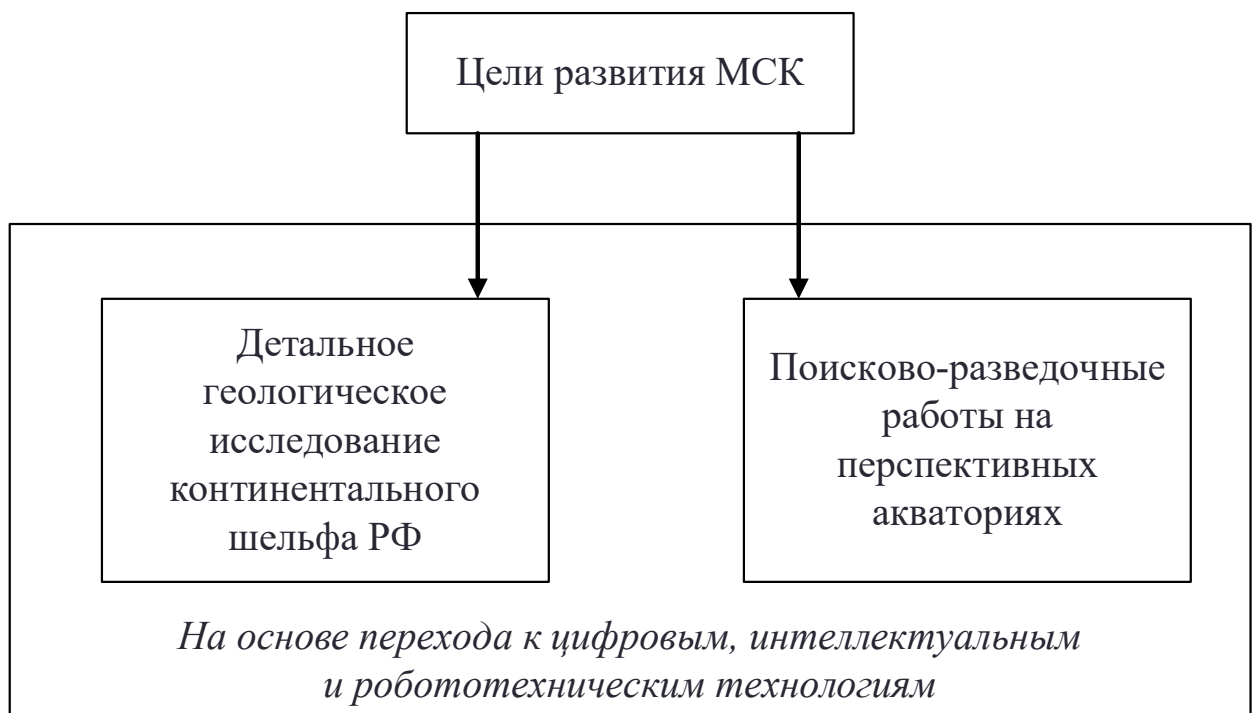


Рисунок 1 – Цели развития МСК (составлено автором)

Достижение этих показателей поддерживается стратегией развития минерально-сырьевой базы до 2035 года, в которой приоритетом обозначен переход к передовым цифровым, интеллектуальным и робототехническим технологиям сбора и интерпретации геологических данных [19].

Таким образом, первоочередная задача – проведение широкомасштабных геологоразведочных работ на шельфе и в открытом океане, включая поиск новых месторождений нефти, газа, твердых полезных ископаемых. Общий список задач в морских акваториях представлен на рисунке 2. Особое значение имеют арктические морские акватории, огромные ледовые пространства северных морей скрывают значительные запасы энергоресурсов [14].



Рисунок 2 – Задачи МСК в морских акваториях (составлено автором)

Однако экстремальные условия (постоянный ледовый покров, полярная ночь, низкие температуры) затрудняют проведение традиционных исследований. Требуется решения для круглогодичной сейсморазведки и геологоразведки в труднодоступных районах, включая работы подо льдами [3]. Кроме того, для обоснования расширения границ континентального шельфа России в Арктике (в соответствии с Конвенцией ООН по морскому праву) необходимо научно-практическое доказательство – в том числе батиметрическое картирование и отбор образцов грунта на больших глубинах подо льдом [51]. Ещё одна задача – гидрографическое обеспечение развития Северного морского пути, требующее детальной съемки рельефа дна и мониторинга изменений ледовой обстановки [3].

Помимо поисково-разведочных работ, важнейшими задачами являются сопровождение добычи и транспортировки ресурсов. В морской нефтегазодобыче это означает мониторинг состояния подводных трубопроводов, кабельных линий и объектов инфраструктуры (платформ, подводных скважин и т.д.) для своевременного выявления повреждений или утечек. Инциденты в труднодоступных районах крайне опасны и дорогостоящи, поэтому необходимы регулярные обследования трубопроводов и оборудования. Например, для контроля трубопроводов применяются гидроакустические и визуальные инспекции, а также анализ воды на наличие примесей нефти или метана [73].

Задачи экологического мониторинга также входят в интересы МСК: контроль состояния морской среды в районах добычи (качество воды, донных отложений) и оценка воздействия на экосистемы. Кроме того, актуален поиск минерального сырья помимо углеводородов – например, железомарганцевых конкреций, кобальто-марганцевых корок и полиметаллических сульфидов на больших глубинах Мирового океана [49]. Такие объекты могут стать источником

стратегически важных металлов, однако их поиск и оценка запасов требуют масштабных обследований океанического дна на больших глубинах.

Подводя итог, в интересах минерально-сырьевого комплекса России необходимо решать комплекс задач: геолого-геофизическое исследование обширных акваторий (включая Арктику) с целью открытия новых месторождений; мониторинг и обслуживание существующей подводной инфраструктуры добычи; экологический контроль и обеспечение безопасной эксплуатации морских месторождений.

1.2 Анализ современных методов решения задач МСК в морских акваториях: технологии, опыт и перспективы

1.2.1 Обзор существующих средств и технологий, применяемых в морских акваториях России

Основными объектами разработки в морских акваториях РФ являются шельфовые нефтегазовые месторождения. Для их освоения применяются современные технические средства: морские буровые установки различных типов (стационарные платформы, полупогружные и самоподъёмные буровые установки и др.), подводные добычные комплексы, специализированные суда и инфраструктура. Общая классификация технических средств освоения шельфовых нефтегазовых месторождений представлена на рисунке 3.

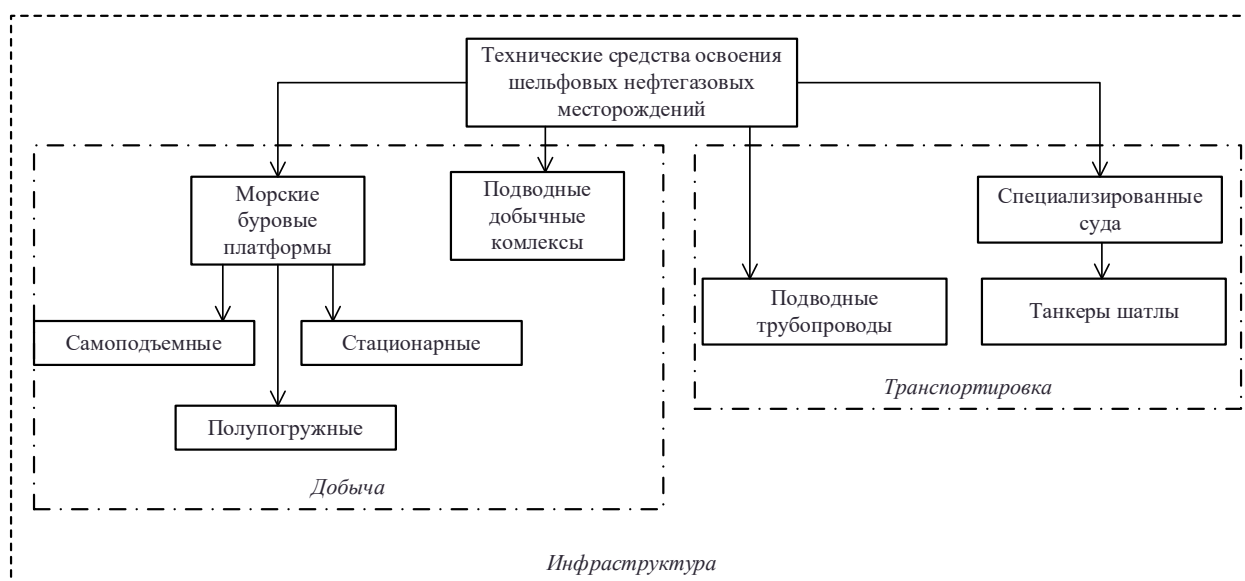


Рисунок 3 – Технические средства освоения месторождений (составлено автором)

На арктическом шельфе создана первая в России ледостойкая стационарная платформа «Приразломная» (Рисунок 4), рассчитанная на работу в экстремальных условиях – низких температур, штормового моря и мощных ледовых нагрузок [27].



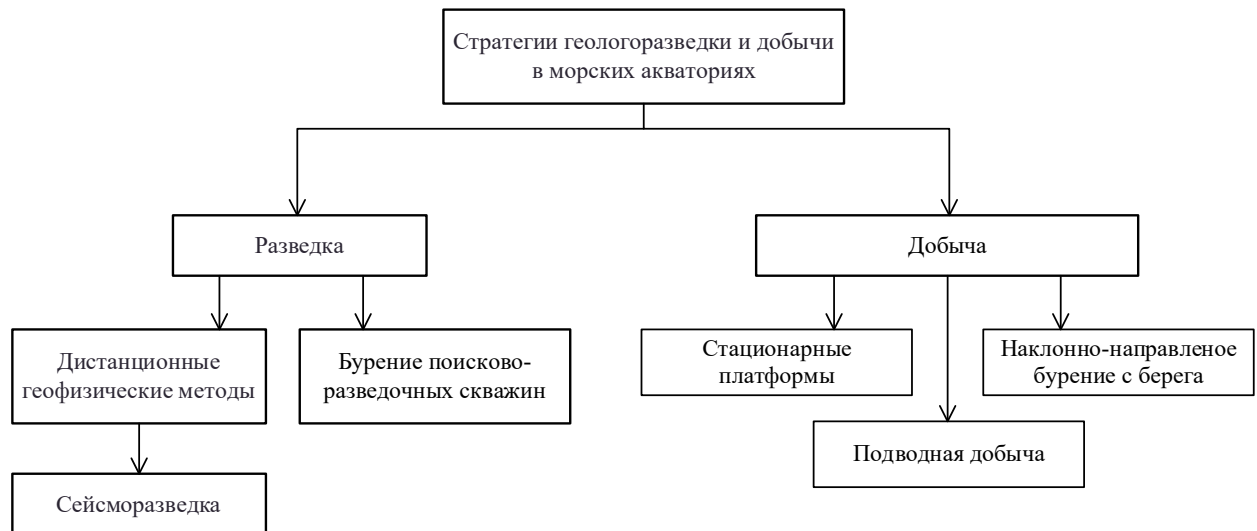
Рисунок 4 - стационарная платформа «Приразломная» [27]

Другая крупнейшая платформа – «Беркут» (проект Сахалин-1) – спроектирована для суровых условий Охотского моря, выдерживая волны высотой до 18 м, морозы до -45°C и давление движущихся льдов толщиной до 2 м; при её строительстве впервые была внедрена система сейсмозащиты под 9-балльное землетрясение и инновационный бетонный ледозащитный пояс вместо металлического [7]. В ряде проектов применяется технология подводной добычи: например, «Газпром» впервые в истории России начал промышленную добычу газа с помощью подводных производственных систем на Киринском месторождении (шельф Сахалина) [20], что позволило обойтись без надводной платформы. Транспортировка добытых углеводородов осуществляется посредством подводных трубопроводов (для газа) или танкеров-шаттлов (для нефти при отсутствии трубопровода на берег), а снабжение отдалённых объектов – с привлечением флота вспомогательных судов снабжения и ледоколов для арктических районов.

1.2.2 Стратегии геологоразведки и добычи в морских акваториях

Геологоразведка шельфовых месторождений основывается на сочетании дистанционных геофизических методов и бурения поисково-разведочных скважин. На начальных этапах выполняются региональные исследования и сейсморазведка (2D/3D сейсмические профили) с использованием специализированных научно-исследовательских судов. Например, на перспективных лицензионных участках Карского моря компания «Роснефть» осуществила обширную 2D-сейсморазведку в условиях почти круглогодичной ледовитости акватории [23],

что позволило выявить крупные структуры и предварительно оценить ресурсы. Далее проводятся детальные 3D-сейсмические съёмки и закладка первых поисково-разведочных скважин с помощью плавучих буровых установок. Стратегии геологоразведки и добычи в морских акваториях представлена на рисунке 5.



7

Рисунок 5 – Стратегии геологоразведки и добычи в морских акваториях (составлено автором)

Для выполнения буровых работ на шельфе привлекаются как отечественные, так и зарубежные установки и специалисты. В России имеются собственные полупогружные и самоподъёмные буровые платформы, однако наиболее сложные задачи до недавнего времени решались при активном участии международных партнёров, обладавших необходимым оборудованием и технологиями. По оценкам Минэнерго РФ, около 80 % технологий, используемых на отечественных морских нефтегазовых проектах, поступало от западных сервисных компаний [17]. Зарубежные разработки отличались высокой степенью технологичности и конкурентоспособности [63], что обусловило зависимость российских работ от импортной техники. В последнее десятилетие предпринимаются усилия по развитию собственной базы морской геологоразведки – в частности, государственный холдинг «Росгеология» выполняет полный цикл работ от региональных геофизических съёмок до параметрического бурения и мониторинга недр, обладая уникальным опытом работы на шельфе [21]. Накопленная научно-техническая база позволяет планировать и проводить поисковые работы на море с опорой на отечественные организации.

Стратегии разработки (добычи) морских месторождений адаптируются под конкретные условия – глубину моря, размер и тип залежей, климатические факторы. В мелководных зонах обычно возводятся стационарные платформы, тогда как для удалённых или глубоководных месторождений все шире рассматриваются варианты подводной добычи или сверхдлинного

наклонно-направленного бурения с берега. Так, на Сахалине применено рекордное по длине горизонтальное бурение с береговой площадки (скважина длиной ~12,3 км) для охвата прибрежных морских залежей без строительства морской платформы [7]. При обустройстве крупных месторождений предусматривается поэтапное бурение десятков скважин (добывающих и нагнетательных) с единой платформы и поддержание пластового давления методом заводнения для стабилизации уровня добычи. Например, на Приразломном месторождении реализована схема периферийного заводнения через горизонтальные нагнетательные скважины, что позволило к пятому году выйти на плато добычи порядка 7,5 млн тонн нефти в год [27]. В отсутствие трубопроводной инфраструктуры на берег применяются плавучие системы хранения и отгрузки продукции: так, нефть с Приразломного перевозится к плавучему хранилищу и далее вывозится морскими танкерами-шаттлами ледового класса [27]. Для обеспечения круглогодичной работы в Арктике в проектных решениях закладывается использование ледокольных транспортно-буксирных судов и аварийно-спасательных средств, способных обеспечивать деятельность объектов зимой.

1.2.3 Мониторинг и экологический контроль в морских операциях

Обязательной частью морских нефтегазовых проектов является экологический мониторинг и контроль. Операторы разрабатывают и реализуют программы наблюдений за состоянием морской среды, контролируя уровни загрязняющих выбросов и сбросов, и проводят регулярные учения по ликвидации возможных разливов нефти. Например, для нового центра перегрузки СПГ на Камчатке компания «Новатэк» согласовала с регуляторами научную программу комплексного мониторинга прибрежных вод с целью минимизации техногенного воздействия [56].

Крупные нефтегазовые компании внедряют повышенные экологические стандарты при работе на шельфе. Так, «Лукойл» первым применил на своих морских платформах принцип «нулевого сброса» (полное исключение сброса производственных отходов в море) и обеспечивает постоянный экологический мониторинг, регулярно проводя тренировочные учения персонала по реагированию на разливы нефти [74]. Государственные надзорные органы (например, Росприроднадзор) контролируют соблюдение экологических требований на этапах разработки месторождений, а для оценки последствий добычи привлекаются научные институты, выполняющие мониторинг состояния морских экосистем и биоресурсов в районах деятельности. Кроме того, в арктических морях активно используется дистанционное зондирование Земли в целях экологического контроля: многолетние спутниковые наблюдения с использованием радиолокационных спутников Sentinel-1 позволили составить карты распределения нефтяных загрязнений в Баренцевом море [45], выявив наиболее загрязнённые

зоны и источники разливов. Непосредственно на месторождениях применяются также локальные системы промышленной безопасности – например, на Приразломном для обслуживания платформы выделены многофункциональные ледокольные суда, выполняющие задачи транспортного обеспечения, аварийно-спасательных работ и экологического контроля (патрулирование на наличие разливов и др.)[27]. Таким образом, в современной практике уделяется большое внимание предотвращению аварий и постоянному контролю за состоянием окружающей среды при освоении морских ресурсов.

1.2.4 Эффективность технологий и перспективы их модернизации

Практика показывает, что современные технологии позволяют успешно добывать минерально-сырьевые ресурсы в море даже в сложных климатических условиях. Действующие российские проекты (разработки на шельфе о. Сахалин, Каспийского моря, единственное арктическое месторождение Приразломное) достигли устойчивых уровней добычи нефти и газа, продемонстрировав надёжность и результативность применённых технических решений. В то же время себестоимость морской добычи остаётся высокой, а сроки реализации новых проектов – значительными, ввиду сложности работ и необходимости создания инфраструктуры с нуля. Ряд перспективных начинаний откладывается из-за экономико-технологических трудностей: так, разработка гигантского Штокмановского месторождения газа в Баренцевом море до сих пор не начата, а планы по освоению других арктических участков сдвигаются на более поздние сроки, в том числе вследствие санкционных ограничений, затрудняющих доступ к передовым зарубежным технологиям [40]. Таким образом, эффективность применяемых сейчас технологий можно считать доказанной на уже освоенных объектах, однако освоение новых, более труднодоступных ресурсов (особенно на больших глубинах и в ледовых районах) требует дальнейшего развития и совершенствования технических средств.

Перспективы модернизации технологий МСК в морских акваториях связаны с повышением автономности, надёжности и экологичности морских работ. После ограничения доступа к западному оборудованию Россия взяла курс на импортозамещение и развитие собственных решений, хотя достижение полного технологического суверенитета – сложная задача, требующая времени [75]. Одно из приоритетных направлений – роботизация и цифровизация. Таким образом, дальнейшая модернизация технических средств – от буровых комплексов до средств мониторинга – ориентирована на обеспечение более эффективного, безопасного и экологически устойчивого освоения минерально-сырьевых ресурсов морей и океанов в долгосрочной перспективе.

1.3 Оценка современных и перспективных АНПА: состояние и потенциал для решения задач в интересах МСК

Одним из наиболее перспективных способов решения вышеперечисленных задач считается применение автономных необитаемых подводных аппаратов [50]. Современные АНПА представляют собой высокотехнологичные робототехнические комплексы, способные выполнять широкий спектр работ под водой без непосредственного управления оператором. Благодаря внедрению цифровых и интеллектуальных технологий в системы управления, АНПА переживают период быстрого развития и становятся всё более автономными и функционально насыщенными [30]. По сути, это отдельный класс робототехники со своей спецификой, включающей набор бортовых систем (навигация, управление движением, энергоснабжение, полезная нагрузка и пр.) и уникальные технические характеристики. Классификация подводных аппаратов по различным признакам представлена на рисунке 6.

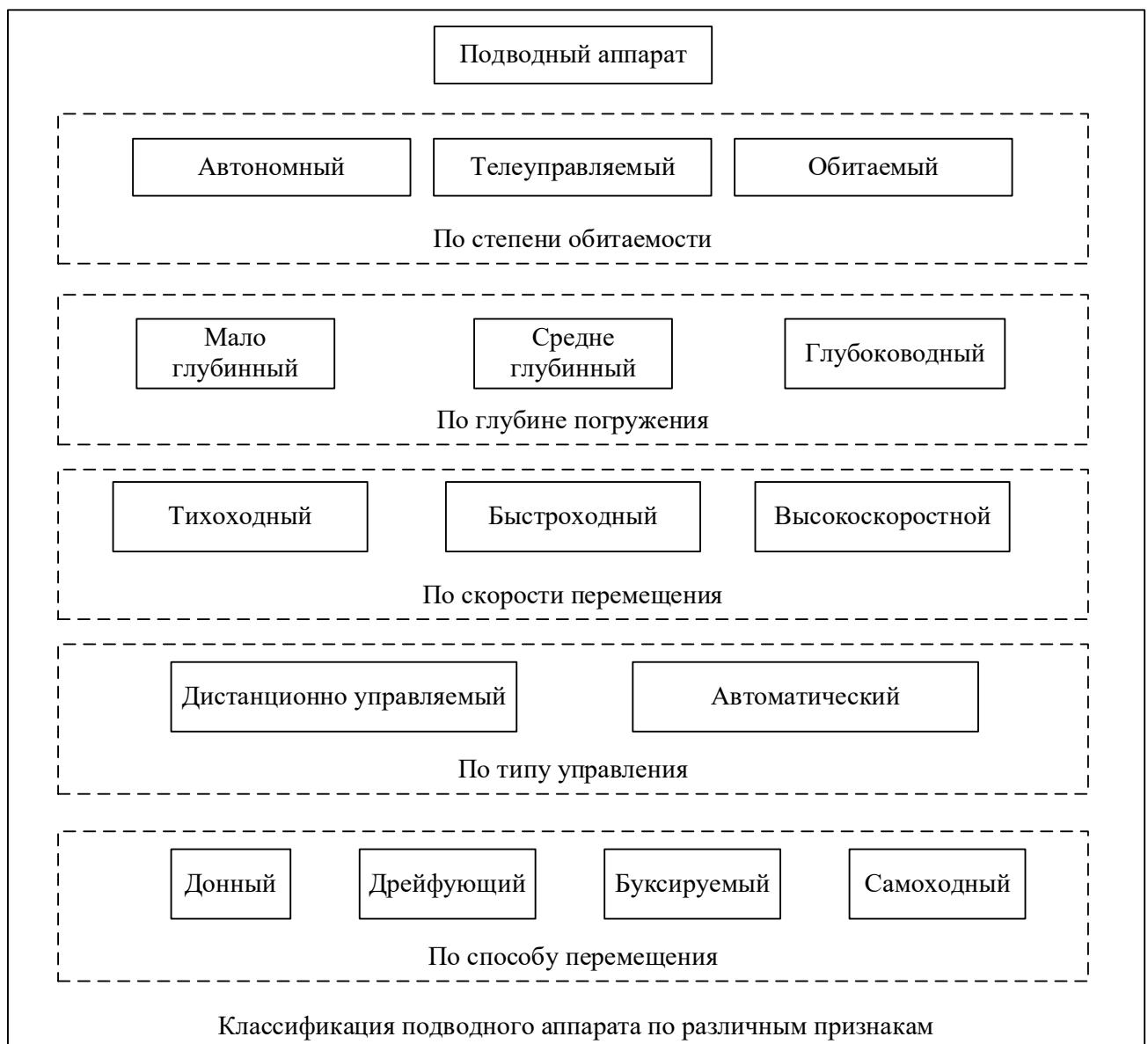


Рисунок 6 – Классификация подводных аппаратов (составлено автором)

Мировой опыт показывает, что современные АНПА успешно решают множество сложных задач подводных исследований и работ. Они обладают рядом важных преимуществ по сравнению с телеуправляемыми аппаратами: во-первых, отсутствие кабеля-связи с носителем даёт АНПА большую мобильность и возможность работать в труднодоступных местах (например, подо льдами) [51]. Во-вторых, автономные аппараты могут длительно функционировать без всплытия, что ценно при мониторинге экологических параметров) [43]. В-третьих, эксплуатационные затраты на АНПА ниже по сравнению с обитаемыми аппаратами или даже телеуправляемыми необитаемыми подводными аппаратами (ТНПА), так как не требуется постоянного присутствия судна-носителя или поддержки большого экипажа во время выполнения миссии [30]. По этой причине АНПА экономически выгодны для протяжённых работ, например, при съёмке дна вдали от береговой инфраструктуры.

Благодаря своим функциональным возможностям, современные АНПА уже сегодня способны выполнять практически весь перечень подводно-технических работ, необходимых МСК. Задачи АНПА в интересах МСК в морских акваториях представлены на рисунке 7.

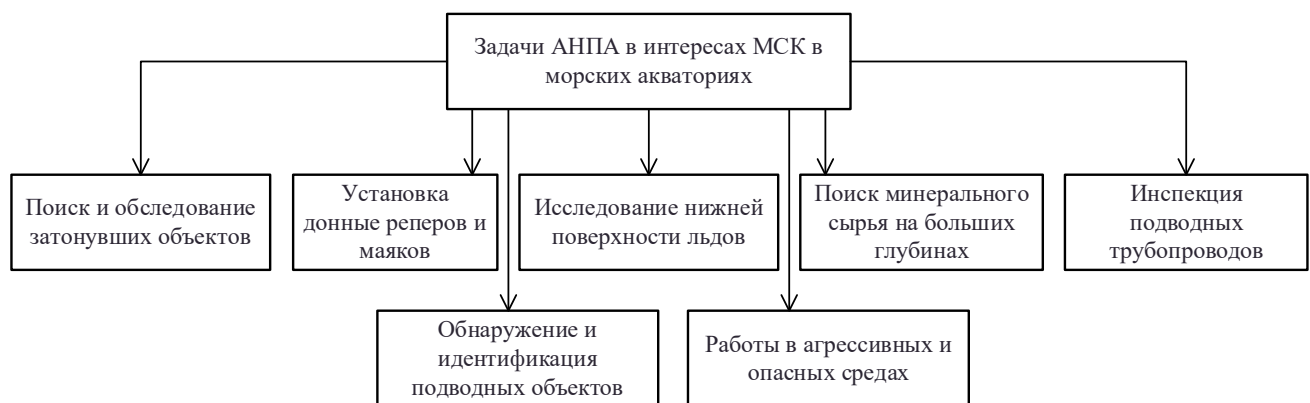


Рисунок 7 – Задачи АНПА в интересах МСК (составлено автором)

В частности, практика применения АНПА включает следующие операции:

- поиск и обследование затонувших объектов [69];
- установка донных реперов и маяков [43];
- исследование нижней поверхности льдов (толщины и структуры), проведение подлёдных гидрологических измерений [51];
- поиск минерального сырья на больших глубинах с предварительным определением химического состава пород [70];
- инспекция подводных трубопроводов, кабелей и других сооружений [46];
- обнаружение и идентификация заданных подводных объектов [69];
- работы в агрессивных и опасных средах [55].

Из данного перечня особенно актуальны для минерально-сырьевого комплекса именно поисково-разведочные и инспекционные функции: современные АНПА могут проводить

детальное картографирование дна, искать аномалии, указывающие на наличие полезных ископаемых, брать пробы или выполнять локальный анализ, а также выполнять высокоточное обследование протяжённых объектов (трубопроводов) на наличие утечек или повреждений.

Современное состояние парка АНПА в мире характеризуется большим разнообразием аппаратов – от компактных лёгких АНПА массой менее 100 кг, до тяжёлых глубоководных аппаратов длиной несколько метров. Около 30% известных аппаратов способны погружаться глубже 1000 м, тогда как большинство рассчитано на меньшие глубины, и лишь единицы – на экстремальные глубины порядка 6000 м и более [58]. Тем не менее, технологический прогресс постепенно расширяет этот «горизонт глубин». Ярким примером служит российский автономный необитаемый подводный аппарат «Витязь-Д» (Рисунок 8), который в 2020 году впервые достиг дна Марианской впадины (~10028 м) в полностью автономном режиме [76]. «Витязь-Д» длиной ~5,7 м и массой 5,7 т способен погружаться до 12 000 м, неся на борту систему искусственного интеллекта для обхода препятствий и навигации в сложной обстановке.

Он оснащён широким набором датчиков (включая камеры, боковой гидролокатор, эхолоты, доплеровский лаг, датчики параметров среды) и может передавать данные на судно-носитель или надводную станцию через гидроакустический канал, а при всплытии – по спутниковой связи. Данный пример демонстрирует потенциал отечественных разработок выходить на мировой уровень по глубинности и автономности, что непосредственно важно для геологоразведки в самых труднодоступных районах океана.



Рисунок 8 - Витязь-Д [75]

Зарубежные аналоги также достигли высоких результатов. Норвежская серия аппаратов HUGIN компании Kongsberg Maritime широко используется для морских исследований и в нефтегазовой индустрии. Аппараты HUGIN способны работать на глубинах до 3000–4500 м,

оснащаются современным набором датчиков для съемки дна (многолучевой эхолот, боковой сонар, магнитометр, камеры и др.) и специализированными алгоритмами для следования рельефу местности и объектам. На рисунке 9, представлен спуск аппарата HUGIN 1000 на воду. У HUGIN 1000, реализована функция автоматического следования вдоль подводных трубопроводов на высоте всего ~3 м над трубой с одновременным сбором сонарных и визуальных данных высокого разрешения [73]. Это позволяет обнаруживать даже незначительные повреждения или утечки (аппарат способен «учуять» в воде следы метана или нефти) и быстро обследовать большие участки трубопровода. HUGIN активно применяется компаниями Fugro, DOF Subsea и др. для геофизических съёмок морского дна, инспекции подводных сооружений и экологического мониторинга. Данный пример иллюстрирует потенциал современных АНПА эффективно решать сразу несколько задач за один выезд – например, одновременно проводить картирование дна, поиск признаков нефти/газа и инспекцию инфраструктуры.

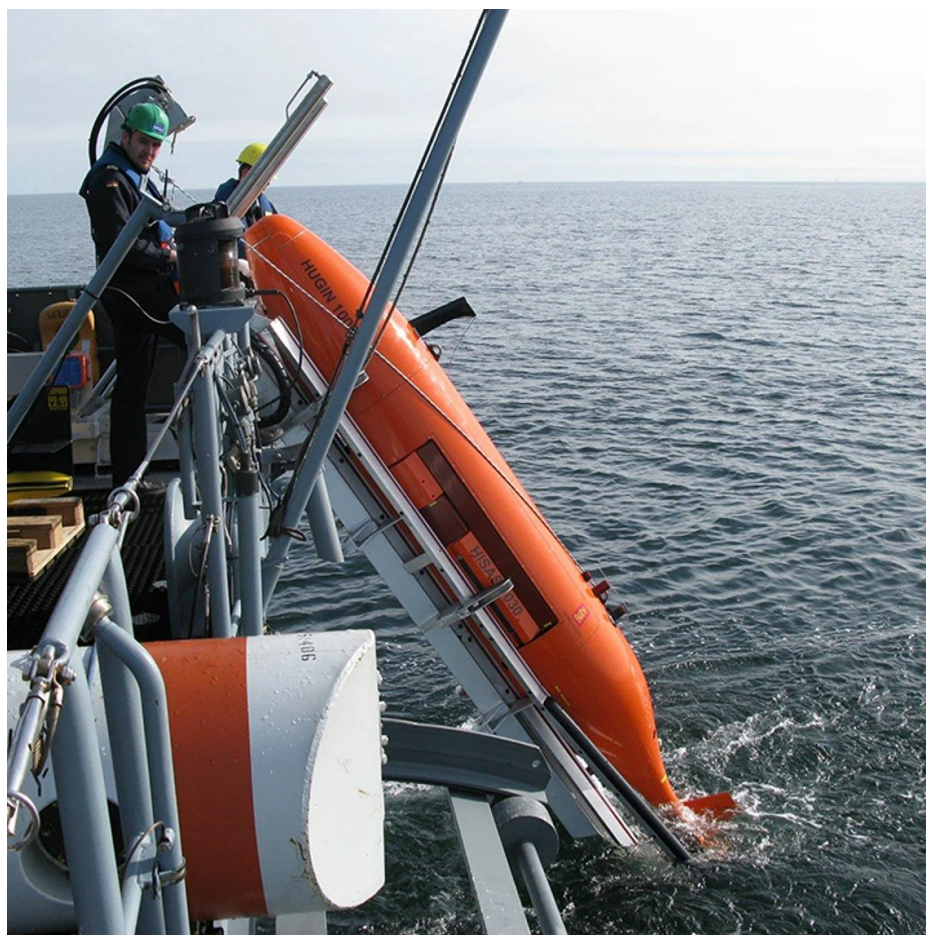


Рисунок 9 – Спуск HUGIN 1000 на воду [73]

Перспективные разработки идут по пути увеличения автономности, длительности работы и адаптации к особым условиям. Так, в России создаётся аппарат типа «Сарма» – большой автономный необитаемый подводный аппарат для подлёдных операций. По данным

разработчиков, АНПА «Сарма» (длиной ~7,5 м) получит энергоустановку с водородно-кислородным электрохимическим генератором и сможет автономно работать подо льдом до трёх месяцев, проходя до 8000 км без всплытия [75]. Заявленная глубина погружения ~1000 м достаточна для большинства арктических шельфовых зон. Такой аппарат должен уметь поддерживать связь (например, через периодические всплытия в полыньях или подлёдную акустическую связь) и выполнять поставленные задачи (сейсморазведка, мониторинг) в течение полярной ночи. Если данный проект будет успешно реализован, это откроет качественно новую страницу в освоении арктических ресурсов – появится возможность круглогодично исследовать и контролировать шельф без привлечения дорогостоящих ледоколов и риска для людей.

Обобщая, современное состояние технологий АНПА уже позволяет решать многие задачи МСК, а перспективные аппараты обещают еще более высокую эффективность. Развитие АНПА движется в направлении повышения глубины и дальности плавания аппаратов, расширения набора датчиков и функций, а также роста «интеллекта» на борту.

1.4 Сравнительная оценка традиционных и роботизированных средств и методов решения задач МСК в морских акваториях

Внедрение АНПА существенно меняет баланс эффективности, стоимости и безопасности операций на море. Рассмотрим ключевые аспекты. Выводы представлены на рисунке 10.

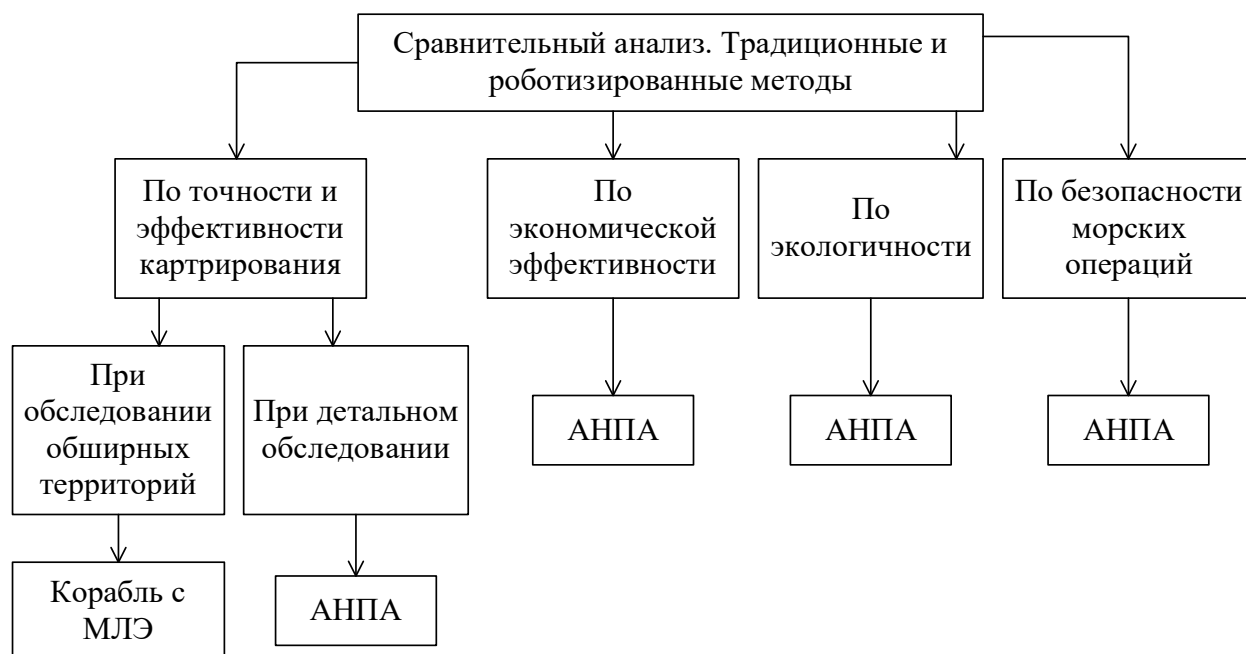


Рисунок 10 – Сравнительный анализ традиционных и роботизированных методов (составлено автором)

1.4.1 Точность и эффективность картирования

Автономные необитаемые подводные аппараты позволяют получать данные беспрецедентно высокого разрешения и точности. Например, использование АНПА вместо буксируемого сонара улучшает детализацию картирования донных россыпей алмазов и снижает затраты на разведку. АНПА могут работать ближе к дну и выполнять съемку с более плотной сеткой профилей, что повышает вероятность обнаружения мелких объектов и тонких структур [28]. Кроме того, АНПА маневрируют плавно, минимизируя разрывы данных, возникающие при поворотах судна, что сокращает время съемки.

При обследовании обширных акваторий традиционные буксируемые системы пока выигрывают в скорости покрытия территории: корабль с многолучевым эхолотом может за день исследовать сотни квадратных километров, тогда как одиночный АНПА из-за ограничений по батарее и скорости охватывает меньшую площадь [8]. Поэтому на этапе рекогносцировки целесообразнее использовать судовые геофизические комплексы, а для детальной съемки перспективных участков — сети АНПА.

В сложных условиях (подо льдами, у платформ, на мелководье) АНПА часто не имеют альтернатив по эффективности, так как могут работать там, где традиционные методы не применимы [26].

1.4.2 Экономическая эффективность

Традиционные методы разведки и добычи требуют значительных затрат на инфраструктуру, включая флот для сейсморазведки и морские платформы для бурения. Час работы исследовательского судна или буровой установки обходится крайне дорого. В то же время использование АНПА позволяет снизить издержки в несколько раз [16]. Например, подводные глайдеры способны месяцами патрулировать без поддержки судна, экономя топливо и расходы на экипаж. В эксперименте компании Total с АНПА-глайдерами было показано сокращение расходов на разведку и ускорение получения данных по сравнению с традиционной схемой [9]. Компания De Beers сообщила, что переход к АНПА позволил проводить высоко детализированную съемку с экономической выгодой, тогда как раньше ее не выполняли из-за высокой стоимости [61].

Хотя современные АНПА стоят дорого (крупный океанский АНПА может стоить нескольких миллионов долларов), их многократное использование оправдывает вложения. В добычных операциях они снижают операционные затраты, заменяя дайверов и ТНПА, что сокращает время инспекций с дней до часов [10].

1.4.3 Экологические преимущества

Традиционные методы разведки связаны с серьезными экологическими рисками. Сейсмические исследования, сопровождающиеся мощными звуковыми импульсами, могут негативно влиять на морскую фауну, а бурение и дноуглубительные работы загрязняют акватории [25]. В отличие от этого, АНПА минимально вмешиваются в экосистему: они сканируют воду и дно, используя слабые акустические сигналы. Вероятность столкновения с морскими животными низка благодаря их небольшим размерам и наличию систем избегания препятствий. Более того, АНПА помогают сократить воздействие добычи на окружающую среду. Активные гидротермальные источники – это уникальные экосистемы, в которых обитает множество эндемичных организмов, адаптированных к экстремальным условиям (высокая температура, высокая концентрация сероводорода и металлов). Если такие участки подвергаются разработке, то экосистема может быть безвозвратно утрачена, поскольку она сформировалась и эволюционировала столетиями или тысячелетиями.

При помощи АНПА по данным видеосъемки, проб и измерений можно выбирать для промышленной добычи только неактивные (затухшие) поля. В них уже нет жизненно важных для экосистем гидротермальных флюидов, поэтому и экологический урон будет значительно меньше. Традиционные методы, как правило, не дают столь четкой границы между активными и неактивными участками, что повышает риск случайного вторжения в действующий гидротермальный район [13]. АНПА также играют ключевую роль в мониторинге экосистем после завершения добычи, помогая оценить темпы восстановления окружающей среды.

1.4.4 Повышение безопасности морских операций

Морские операции всегда сопряжены с высокими рисками: штормы, аварии на платформах, судовые катастрофы и водолазные работы приводят к человеческим жертвам. АНПА позволяют минимизировать риски для персонала, так как операторы находятся на берегу или на судне обеспечения, а под водой работают машины [4].

Например, инспекция платформ водолазами требует непосредственного участия людей, тогда как АНПА могут выполнять аналогичную задачу дистанционно. Особенно актуально это в Арктике, где условия работы ограничены коротким летом, а зимой присутствие человека практически невозможно [12].

Однако с развитием автономных технологий возникают новые риски: потеря дорогостоящего аппарата, сбой в навигации или управлении. Для решения этих проблем современные АНПА оснащаются резервными системами аварийного всплытия и радиомаяками для предотвращения утраты [6].

1.4.5 Технические ограничения и перспективы развития

Несмотря на все преимущества, АНПА имеют ряд ограничений (Рисунок 11). Одно из ключевых — ограниченная энергоёмкость: большинство аппаратов работают на аккумуляторах, которых хватает на 20–30 часов [26]. Решение видится в развитии подводных станций подзарядки и альтернативных источников энергии.

Еще одна проблема — подводная связь. Радиоволны в воде не распространяются, поэтому обмен данными идет по акустическому каналу, который медленный и подвержен помехам [2]. АНПА действуют автономно по заранее загруженной программе, а оператор получает телеметрию с задержкой. Навигация без GPS также остается вызовом: ориентация осуществляется по инерциальным системам с периодической коррекцией по акустическим маякам или при всплытии [29].

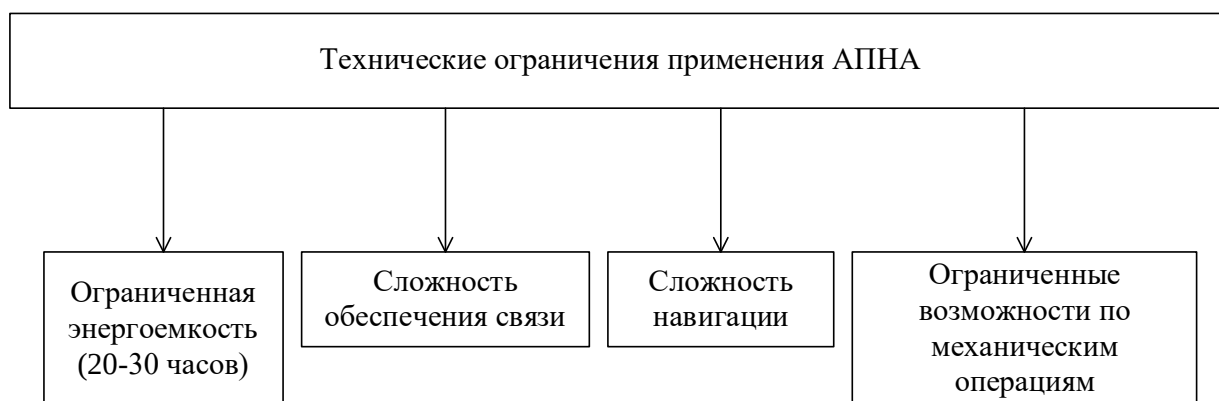


Рисунок 11 – Ограничения применения АНПА (составлено автором)

Наконец, АНПА пока не могут заменить традиционное бурение или поднятие крупных образцов породы. Однако развитие электроники, аккумуляторов и программного обеспечения постепенно снижает эти барьеры.

Традиционные методы разведки остаются основой освоения шельфа, особенно на стадиях широкомасштабного поиска и добычи. Однако АНПА уже сейчас значительно повышают эффективность, снижая затраты, повышая безопасность и снижая экологические риски. Роботы выполняют «грязную, скучную и опасную» работу под водой, а операторы сосредотачиваются на управлении процессом. Развитие технологий ведет к увеличению доли роботизированных решений в морской добыче полезных ископаемых.

1.5 Анализ состояния и тенденций развития систем управления АНПА и их функциональных возможностей для решения задач МСК

Эффективность применения автономных необитаемых подводных аппаратов во многом зависит от совершенства их системы управления — информационно-управляющей системы (ИУС).

Современные АНПА представляют собой сложные киберфизические системы, которым приходится действовать в динамической и неопределённой среде без постоянной связи с оператором. Это требует от бортовых систем управления высокого уровня «интеллекта» – способности самостоятельно распознавать обстановку, принимать решения и адаптировать свои действия. Анализ научных публикаций показывает, что именно недостаточная развитость систем управления ныне сдерживает реализацию всех потенциальных функций АНПА [68]. Текущий уровень технологий и методологий проектирования не позволяет в полной мере задействовать весь возможный функционал автономных аппаратов [30]. Другими словами, хотя сами по себе платформы АНПА (корпуса, энергетические установки, датчики) достигли высокой совершенности, их «мозг» – управляющие алгоритмы и программно-аппаратные комплексы – ещё нуждается в развитии. Основные направления развития АНПА в современных условиях представлены на рисунке 12.



Рисунок 12 – Основные направления развития АНПА (составлено автором)

Как в России, так и за рубежом, прослеживается ключевая тенденция: интеграция методов искусственного интеллекта в системы управления АНПА. Эксперты отмечают, что именно применение технологий ИИ является наиболее перспективным направлением автоматизации подводных аппаратов [72]. Цель состоит в переходе от жёстко запрограммированных действий к более гибкому, адаптивному поведению аппарата. Идеальная

система управления должна обеспечивать аппарату ряд высокоуровневых когнитивных функций: автоматическое распознавание образов (например, особенностей рельефа или целей наблюдения), принятие решений в условиях неполной или неопределённой информации, адаптацию к меняющейся обстановке, оптимальный выбор маршрута, а также способность корректировать свои действия на основе изменений ситуации [35]. Кроме того, учитывая ответственность работ (например, дорогостоящие объекты или рискованные операции), система должна обладать прозрачностью принимаемых решений и возможностью безопасного завершения миссии (возврата в исходную точку) в случае сбоев [47]. Реализация всего комплекса этих требований – сложная научно-техническая задача, которая решается поэтапно.

На текущий момент многие ведущие морские научные лаборатории и компании сосредоточены на разработке технологий, повышающих автономность и надёжность управления АНПА. За рубежом ведутся работы над системами длительной навигации вне зоны действия GPS, что особенно важно для аппаратов дальнего действия [42]. Разрабатываются компактные системы связи и энергопитания, способные поддерживать функционирование аппарата в течение месяцев [48]. Появляются экспериментальные образцы глубоководных станций-докков, позволяющих АНПА «базироваться» на дне и периодически подзаряжаться и передавать данные без подъёма на поверхность [77]. Совершенствуется элементная база вычислителей: современные процессоры и нейросетевые ускорители позволяют переносить на борт всё более сложные алгоритмы обработки данных в реальном времени. Например, реализуются алгоритмы предотвращения столкновений на основе машинного зрения и сонаров, что уже используется в аппаратах типа «Витязь-Д» (способных обходить препятствия самостоятельно) [76]. В перспективе ожидается, что АНПА будут способны к групповой работе (роевой интеллект) и распределению задач между несколькими аппаратами, что повысит эффективность при обследовании больших площадей [38].

Отечественные разработки систем управления пока уступают мировому уровню по ряду направлений, что обусловлено исторически меньшим объемом работ и финансирования в этой сфере. В исследованиях отмечается острая нехватка специалистов и технологий в области создания АНПА и систем управления ими в РФ [50]. Так, ещё в 2011г. Боженков указывал, что в России слабо реализован даже имеющийся задел по автономным аппаратам, тогда как в западных странах накоплен опыт их применения для подлёдного картографирования шельфа с отбором проб [3]. Лавёров и др. отмечали отставание России в вопросах исследования шельфа, в частности, недостаток ресурсов, технологий и кадров для проведения сейсморазведки на морях [14]. Спустя десятилетие ситуация постепенно выправляется: реализованы отдельные проекты (например, упомянутые «Витязь-Д»), разрабатываются «Сарма» и др., однако системно

проблема дефицита компетенций остаётся. В 2013г. Бардачевский и Безсуднов подчёркивали острую нехватку специалистов именно в области систем управления АНПА [1] – это означает, что, даже спроектировав корпус и механическую часть аппарата, сложно реализовать конкурентоспособную ИУС без должной научной школы.

Тем не менее, тренды развития отечественных и зарубежных систем управления совпадают: рост автономности, интеллектуализация, адаптация к сложным условиям. Зарубежный опыт свидетельствует о стремлении создать организованные «умные» системы управления, способные решать все более широкий круг задач без вмешательства человека [44, 48, 53]. Отечественные исследования также идут в направлении создания «интеллектуальной» ИУС для АНПА, отвечающей современным требованиям по качеству решаемых задач [15]. По мнению экспертов, наиболее перспективны работы по применению искусственного интеллекта в ИУС АНПА [33, 37, 64], что подразумевает развитие алгоритмов машинного обучения для распознавания образов, принятия решений и планирования миссий в реальном времени.

Таким образом, можно констатировать: состояние систем управления АНПА находится на этапе перехода к новому поколению, основанному на искусственном интеллекте и высокой степени автономности. Зарубежные образцы демонстрируют отдельные элементы таких систем (навигация, групповое взаимодействие, адаптивное планирование), в России также ведутся активные исследования, продиктованные насущной потребностью МСК эффективно осваивать труднодоступные акватории. В следующих разделах рассмотрены конкретные методы информационного обеспечения функционирования АНПА и архитектурные особенности существующих ИУС, что позволит выделить направления для дальнейшего совершенствования.

1.6 Оценка существующих методов и алгоритмов информационного обеспечения функционирования АНПА

Информационное обеспечение работы автономного необитаемого подводного аппарата включает весь комплекс методов сбора, обработки, передачи и использования данных, необходимых для успешного выполнения им поставленной задачи (Рисунок 13).

В условиях подводной среды, где отсутствует доступ к спутниковой навигации GPS и сильно ограничены каналы связи, особое значение имеют алгоритмы навигации, ориентации и ситуационной осведомлённости аппарата [39]. Современные АНПА, как правило, оснащаются инерциальной навигационной системой (ИНС) в сочетании с доплеровским лагом и гидроакустическими дальномерами/маяками; используется комплексная обработка измерений (алгоритмы фильтрации, например фильтр Калмана) для оценки траектории движения [54]. Для расширения объёма получаемой информации применяются многолучевые эхолоты и боковые гидролокаторы, обеспечивающие картину рельефа дна и объектов на нём [59]. Алгоритмы

картографирования позволяют по этим данным строить 3D-модель дна (т.н. реконструкция местности) и сопоставлять её с эталоном, что может использоваться для коррекции навигации – такой подход известен как одновременная локализация и построение карты (SLAM) [34].

Например, при движении вдоль трубопровода бортовые программы могут распознавать сам трубопровод в данных сонара и удерживать аппарат на заданном расстоянии, даже если снос течением мешает точному следованию маршруту [71]. Этот же принцип применим и для поиска полезных ископаемых: аппараты сканируют дно в поисках характерных аномалий (магнитных, геохимических, акустических), а алгоритмы классификации помогают отличить, скажем, возможное скопление сульфидной руды от фона [66].



Рисунок 13 – Особенность информационного обеспечения АНПА (составлено автором)

Отдельное внимание уделяется алгоритмам планирования и выполнения миссий. Для полного охвата зоны исследования используются заранее рассчитанные маршруты (например, в виде «змейки») [5]. Однако жёстко заданной траектории бывает недостаточно – если аппарат обнаружит нечто интересное (аномальный сигнал), желательно уметь отклониться от плана и детально обследовать находку [32]. Тут вступают в действие алгоритмы адаптивного планирования миссии, позволяющие АНПА в автономном режиме менять последовательность действий на основе входящих данных [41]. Такие алгоритмы опираются на принципы искусственного интеллекта: например, заранее обученные нейросети могут в реальном времени анализировать изображения с камеры или сонограммой сонара и выявлять объекты заданного типа (скажем, потенциальные образцы кобальто-марганцевых конкреций на грунте) [31]. При обнаружении такого объекта система управления может принять решение о дополнительном обходе района, снижении хода для более тщательного сканирования или взятии пробы манипулятором (если он имеется). Подобные возможности находятся в стадии активной

разработки; как отмечается в исследованиях, нынешние системы АНПА ещё сталкиваются с рядом ограничений [50]:

- недостаточная автономность;
- задержки обработки данных;
- слабая адаптивность маневрирования в быстро меняющейся обстановке.

Например, ограниченная пропускная способность бортовых вычислителей приводит к тому, что большой объём гидролокационных данных часто сохраняется для последующего анализа уже после возвращения аппарата, вместо немедленной обработки на борту. Из-за этого решения принимаются с запаздыванием, что снижает эффективность работы в режиме реального времени [36]. Также, высокая энергоёмкость вычислительных задач ограничивает их применение: интенсивная обработка изображений или сигналов требует больших затрат энергии, сокращая длительность миссии при работе от батарей [57]. Эти проблемы сейчас являются предметом исследований, и предлагаемые концепции ИУС предусматривают оптимизацию по энергопотреблению, устойчивости связи и быстродействию обработки данных.

К методам информационного обеспечения следует отнести и системы связи, позволяющие получать данные от аппарата и передавать ему команды. Под водой единственным средством дальней связи остаётся гидроакустический канал, однако он обладает низкой скоростью передачи и подвержен помехам [52]. Поэтому большинство АНПА работают по схеме периодического сеанса связи: аппарат либо всплывает на поверхность для передачи данных по радиоканалам, либо сближается с подводной базовой станцией/буксом-повторителем [30, 52]. Алгоритмы управления должны учитывать окна связи и заранее буферизовать критичные данные. В перспективе разрабатываются системы подводной связи с использованием оптических каналов на короткие дистанции (для высокоскоростной передачи объёмных данных, например, видеопотока, при обслуживании аппарата роботом-базой).

Информационное обеспечение включает также методы обработки данных после завершения миссии – постобработка полученной информации для принятия решений заказчиком (геологом, инженером) [66]. Однако уже на этапе выполнения задачи АНПА должен максимально эффективно собирать и интерпретировать данные. В современных проектах предлагается концепция «умного» борта, который не просто записывает всё подряд, но выделяет ключевые сведения [62]. Например, система может в реальном времени построить карту рельефа и сразу выделить участки с аномальным магнитным полем или повышенной температурой, указывающие на возможное месторождение. Таким образом, к окончанию миссии аппарат предоставит специалистам не сырые терабайты измерений, а готовые к анализу продукты: карту, список выявленных аномалий, фотографии объектов с геопривязкой.

Подводя итог, существующие методы и алгоритмы информационного обеспечения АНПА находятся на стыке навигационных технологий, методов искусственного интеллекта и систем связи. Значительные успехи достигнуты в навигации (субметровая точность привязки маршрута при использовании инерциально-акустических систем), в картографировании дна и детектировании объектов (современные сонары с высоким разрешением и алгоритмы обработки позволяют различать объекты размером до десятков сантиметров на дне). Тем не менее, имеются и ограничения:

- слабый вычислительный модуль на борту;
- маленький запас по энергии;
- ограниченная связь.

Современные исследования направлены на преодоление этих ограничений – например, за счёт внедрения более совершенных алгоритмов машинного обучения, способных эффективно работать на бортовых компьютерах (включая специализированные чипы для ИИ) [67]. Ожидается, что решение этих задач позволит АНПА действовать ещё более самостоятельно и надёжно, что критически важно для их применения в интересах МСК.

1.7 Выводы по главе 1

На основе проведённого анализа можно сформулировать научную проблему, решению которой посвящено данное диссертационное исследование. Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в рецензируемой научной статье [50].

С одной стороны, минерально-сырьевой комплекс России остро нуждается в технологиях, обеспечивающих эффективное исследование и освоение морских богатств – особенно в Арктике и на больших глубинах, где применение традиционных средств ограничено или невозможно. АНПА признаны одним из самых перспективных инструментов для этих целей, однако существующие АНПА и их ИУС ещё не полностью отвечают всем требованиям отрасли. Главные ограничения связаны с недостаточной автономностью и «интеллектом» устройств, несовершенством систем управления, а также нехваткой отечественных разработок и специалистов в данной области.

С другой стороны, мировой тренд развития подводной робототехники показывает быстрый переход к интеллектуальным ИУС, интегрирующим ИИ, что приводит к появлению новых возможностей решения сложных задач в автономном режиме. Для России крайне важно не отстать в этой гонке технологического развития, учитывая стратегическое значение арктических ресурсов и морского шельфа.

Таким образом, научная задача настоящего исследования заключается в разработке подходов к созданию информационно-управляющей системы автономного необитаемого

подводного аппарата, оптимизированной для решения задач минерально-сырьевого комплекса России. Необходимо провести системный анализ требований МСК к АНПА, выявить недостатки и ограничения существующих методов информационного обеспечения и управления, и на этой основе предложить концепцию (модель) ИУС, обеспечивающей высокое качество выполнения целевых функций. В частности, такая ИУС должна позволять аппарату эффективно выполнять геологоразведочные и технологические операции в условиях ограниченной внешней связи, частичной или полной неопределённости среды и длительной автономной работы. Требуется обеспечить высокую степень адаптивности поведения АНПА, надёжность и безопасность функционирования, а также обработку и предоставление информации в виде, пригодном для использования специалистами МСК.

Для решения поставленной задачи в рамках диссертации необходимо достичь следующих целей:

- разработать концептуальную модель ИУС АНПА, учитывающую специфику применения в интересах МСК (большие глубины, подлёдные работы, необходимость в геолого-геофизических измерениях и т.д.);

- выделить и обосновать ключевые параметры и характеристики ИУС, влияющие на эффективность работы АНПА при выполнении задач МСК, и определить целевые требования к ним (точность навигации, автономность, энергоэффективность, интеллектуальные функции и др.);

- исследовать и предложить методы и алгоритмы информационного обеспечения (навигации, принятия решений, обработки данных) и структуры управления, позволяющие расширить функциональные возможности АНПА – в частности, за счёт элементов искусственного интеллекта и адаптивных алгоритмов;

- разработать прототип или имитационную модель системы управления с заданными свойствами, провести её тестирование на моделях сценариев, характерных для задач МСК (например, выполнение автономной сейсморазведки в подлёдных условиях, поиск объекта на дне и др.), оценить эффективность предложенных решений.

Выполнение указанных этапов исследования позволит внести вклад в преодоление выявленных ограничений существующих АНПА. Ожидается, что результаты работы послужат основой для создания нового поколения отечественных автономных необитаемых подводных аппаратов, способных устойчиво и эффективно решать задачи минерально-сырьевого комплекса страны – от поиска и разведки месторождений на шельфе до мониторинга инфраструктуры и окружающей среды. Это соответствует приоритетам научно-технологического развития РФ в области освоения природных ресурсов и обеспечения энергетической безопасности.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ИНТЕРЕСАХ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

2.1 Разработка возможных сценариев функционирования АНПА при решении задач в интересах минерально-сырьевого комплекса

В разделе представлена разработка сценариев функционирования автономного необитаемого подводного аппарата, ориентированного на решение широкого круга задач минерально-сырьевого комплекса, включая картографирование морского дна, инспекцию подводных трубопроводов и кабельных трасс, экологический мониторинг водной толщи и бентоса, геологоразведочные и гидрофизические исследования. Разработка сценариев осуществлена с учетом технических и эксплуатационных ограничений прототипа аппарата, возможностей доступных средств моделирования, а также характеристик имеющегося аппаратно-программного обеспечения.

Задачи, решаемые АНПА для минерально-сырьевого комплекса, включают следующие направления:

— Высокоточное картографирование морского дна, включающее сбор батиметрических данных, построение детализированных цифровых моделей рельефа дна и выявление донных объектов и аномалий с целью поиска перспективных участков месторождений полезных ископаемых и определения оптимальных маршрутов прокладки подводных коммуникаций.

— Инспекция состояния подводных трубопроводов и кабельных трасс, направленная на обнаружение, трассировку и детальный визуальный и акустический осмотр подводных коммуникаций с выявлением дефектов и последующим планированием технического обслуживания и ремонта.

— Экологический мониторинг водной толщи и бентоса, включающий регулярные измерения физико-химических характеристик водной среды (температура, солёность, концентрация растворённых газов, содержание хлорофилла), оценку состояния донных экосистем и отбор проб воды для лабораторного анализа с целью контроля состояния окружающей среды и соблюдения экологических нормативов при разработке и эксплуатации морских месторождений.

— Геологоразведочные исследования, направленные на предварительную оценку ресурсного потенциала морского дна в отношении таких полезных ископаемых, как железомарганцевые конкреции, полиметаллические сульфиды и газогидраты, с выполнением

отбора проб донных отложений для последующего анализа их состава, концентрации и качества полезных компонентов.

— Гидрофизические исследования и изучение морских течений, направленные на детальное изучение пространственно-временных характеристик морских течений, структуры и динамики водных масс, а также измерение вертикальных профилей течений и оценку турбулентности, что необходимо для проектирования подводных инженерных сооружений и обеспечения безопасной эксплуатации объектов инфраструктуры минерально-сырьевого комплекса.

Рассмотрим реализацию каждого сценарий. Общая схема реализации описанных сценариев представлена на рисунке 14.

Сценарий картографирования морского дна реализуется следующим образом: на предварительном этапе береговой центр разрабатывает подробный маршрут обследования, учитывая рельеф морского дна, прогнозируемые течения и возможные зоны акустической тени, затем загружает траекторию в память аппарата. После запуска с судна-носителя аппарат выполняет первичную фиксацию координат по данным GPS, затем погружается и автономно следует по запланированным галсам на высоте 40–60 метров от дна. Во время движения АНПА непрерывно регистрирует данные батиметрической съёмки и бокового гидролокатора, фиксируя морской рельеф и донные объекты. Периодическая передача телеметрических данных с ограниченной пропускной способностью осуществляется через акустический канал связи, а полные данные доступны только после завершения миссии и подъёма аппарата на борт судна-носителя для последующей обработки.

Сценарий инспекции подводных трубопроводов и кабельных трасс реализуется следующим образом: перед запуском аппарата береговой центр формирует маршрут вдоль известных трасс коммуникаций. После спуска на дно аппарат использует специализированный алгоритм наведения и захвата трассы, после чего автоматически сопровождает трубопровод или кабель на постоянной высоте 3–5 метров над объектом инспекции. В процессе движения камеры высокого разрешения и гидроакустические системы фиксируют состояние внешней оболочки и положение объекта относительно морского дна. При обнаружении дефектных участков аппарат автоматически замедляется и выполняет детальную фото- и видеосъёмку. Судно-носитель в течение миссии получает регулярные краткие отчёты о ходе инспекции и оперативные уведомления при выявлении критических повреждений. После всплытия аппарата полный массив данных передаётся для углублённого анализа и подготовки рекомендаций по обслуживанию и ремонту коммуникаций.

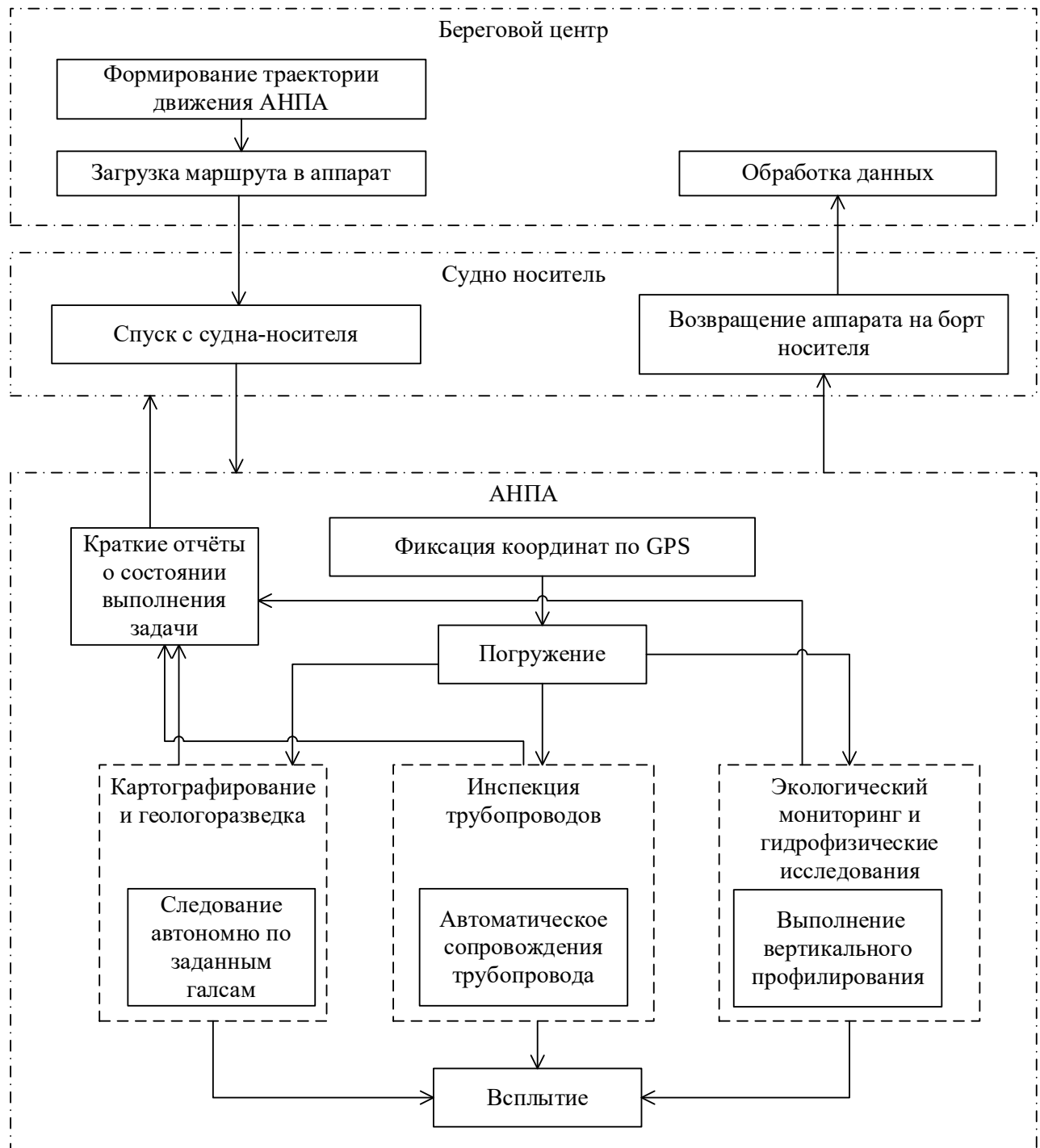


Рисунок 14 – Сценарии решения задач МСК (составлено автором)

Сценарий экологического мониторинга водной толщи предусматривает следующий алгоритм действий: во время миссии АНПА через каждые 500 метров выполняет вертикальное профилирование, задерживаясь на каждом контрольном горизонте в течение 30 секунд для стабилизации показаний датчиков. При регистрации значительных отклонений от фоновых значений аппарат передаёт информацию оператору на судно-носитель. Далее аппарат выполняет гидроакустическое обследование донного участка боковым гидролокатором с частотой 200 кГц, регистрируя особенности донных экосистем. В зонах с повышенной

мутностью автоматически отбирается 1 литр воды для последующего анализа, что позволяет выявлять присутствие редких и инвазивных видов организмов.

Сценарий геологоразведочных исследований реализуется путём выполнения АНПА высокочастотной гидроакустической съёмки перспективных участков на высоте 10–15 метров от дна. При обнаружении признаков залегания полезных ископаемых аппарат выполняет фотограмметрическую съёмку с высоким разрешением для последующего анализа на борту судна-носителя и в береговых вычислительных центрах.

Сценарий гидрофизических исследований предполагает проведение регулярных измерений АНПА вертикальных профилей течений, турбулентности и других параметров водной среды с целью оценки пространственно-временных характеристик водных масс. Полученные данные используются для моделирования динамики водных процессов, оценки влияния течений на устойчивость сооружений и обеспечение безопасности эксплуатации инфраструктуры минерально-сырьевого комплекса.

Взаимодействие АНПА с судном-носителем и береговым центром организовано следующим образом: судно-носитель обеспечивает запуск и подъём аппарата, а также поддерживает акустическую связь в ходе миссии. Береговой центр осуществляет планирование, подготовку миссий и последующую обработку собранных данных.

2.2 Структура модели

Концептуальная модель ИУС АНПА необходима для структурно-параметрического синтеза системы управления.

По существу, это абстрактная модель, описывающая структуру моделируемой системы, свойства ее элементов и причинно-следственные связи в системе, присущие моделируемой системе, необходимые для достижения цели моделирования.

Рассмотрим следующую структуру модели:

- возмущающие воздействия;
- внутренние параметры;
- внешние факторы и окружающая среда;
- управляющие воздействия;
- выходные параметры.

Рассматриваемые параметры представлены на таблице 1.

Таблица 1 – Параметры ИУС АНПА (составлено автором)

Параметры ИУС АНПА					
Входные параметры	Возмущающие воздействия на АНПА	Подводные течения			1
		Изменение воды	Плотность	2	
			Соленость	3	
			Температура	4	
		Нагрузки	Гидростатические	5	
			Ударные	6	
		Воздействие воды	Химическое	7	
			Биологическое	8	
		Сопротивление воды			9
	Внутренние параметры	Масса			10
		Инерция			11
		Гидродинамические коэффициенты	Коэффициент сопротивления	12	
			Коэффициент подъемной силы	13	
			Коэффициенты добавочной массы	14	
			Коэффициенты тангажа и рысканья	15	
		Характеристики двигателей	Тяга	16	
			Эффективность двигателя	17	
			Маневренность	18	
		Батарея	Емкость аккумулятора	19	
			Потребляемая мощность	20	
		Сенсоры	Точность и повторяемость	21	
			Чувствительность	22	
			Диапазон и разрешение	23	
			Время отклика	24	
			Робастность	25	

Продолжение таблицы 1

Параметры ИУС АНПА						
Входные параметры	Внутренние параметры	Конструктивные свойства	Материал	Прочность	26	
				Усталость	27	
			Стойкость к смятию			28
			Стойкость к высокому давлению			29
			Стойкость к вибрациям			30
		Система связи	Затухание сигнала			31
			Ограничения пропускной способности			32
			Многопутевое распространение			33
			Пропускная способность акустического канала			34
			Вероятность ошибки в цифровой связи			35
		Отказоустойчивость	Избыточность			36
			Разнообразие			37
			Обнаружение и изоляция неисправностей			38
			Восстановление после сбоев			39
	Внешние факторы и окружающая среда	Технико-экономические факторы	Инжиниринг надежности			40
			Состояние технологии производства			41
		Природные ресурсы	Запасы лития			42
			Экологическая безопасность			43
Выходные параметры	Вектор движения				44	
	Глубина погружения				45	
	Ориентация в пространстве				46	
	Состояние системы				47	
	Коммуникационные сигналы				48	

2.2.1 Возмущающие воздействия на АНПА

Возмущающие воздействия на автономный необитаемый подводный аппарат определяют влияние окружающей среды на параметры системы.

Подводные течения

Как правило, подводные течения — это постоянные или периодические потоки в толще мирового океана и морских морей. Существуют постоянные течения и неправильные течения; поверхностные и подводные, теплые и холодные. В зависимости от причины течения выделяют ветровые и плотностные течения.

В зависимости от типа течения, в которое попал аппарат, следует применять различные управляющие воздействия. Так же возможно использование течений во благо, для увеличения скорости аппарата, либо для уменьшения расхода энергии.

Изменение плотности, солёности и температуры воды

За счет повышения солёности, увеличения глубин и снижения температуры морской воды плотность воды увеличивается. Только в пресных водах в диапазоне от температуры наибольшей плотности до температуры замерзания (например, от 4 до 0 °C для пресной воды) с понижением температуры плотность морской воды уменьшается. Пределы изменения плотности морской воды в Мировом океане от 1,000 до 1,028 на поверхности и до 1,076 г/см³ на глубине 11 тыс. м. Плотность поверхностных вод убывает от 1,028 г/см³ в субполярных и полярных районах Мирового океана до 1,022-1,023 г/см³ на экваторе. С увеличением глубины плотность морской воды растет не монотонно, а так, что на промежуточной глубине наблюдается слой скачка, с которым связаны такие явления, как внутренние волны, жидкий грунт, мертвая вода, звукорассеивающий слой. От плотности морской воды зависит вес аппарата необходимый для обеспечения нулевой плавучести. Для больших аппаратов увеличение осадки при заходе в пресные воды может достигать 0,3 м. Большие вертикальные градиенты плотности морской воды оказывают влияние на подъем или спуск автономных необитаемых подводных аппаратов.

Гидростатические и ударные нагрузки

Гидростатические силы давления возрастают с увеличением глубины. Автономный подводный необитаемый аппарат подвержен поперечным нагрузкам вследствие давления воды, а также нагрузкам от собственного веса и выталкивающей силы, действующим в противоположных направлениях.

Данные нагрузки оказывают большое влияние на управляющие воздействия аппарата и должны быть учтены, и компенсированы.

Химическое и биологическое воздействие морской воды

Присутствие в морской воде различных микроорганизмов (бактерий, моллюсков, кораллов и т.д.) вызывает биокоррозию металлов. Из-за их роста и скопления на корпусе аппарата и других частях оборудования кислород перестает поступать к поверхности, возникают различные неровности, ухудшение поверхности и усиление коррозии в щелях и трещинах.

Иногда рост микроорганизмов на стальных конструкциях является положительным. Образовавшийся слой может препятствовать процессу коррозии. Например, рост мидий на поверхности стали значительно препятствует коррозии сплава. Это явление связано со значительным потреблением кислорода мидиями.

Помимо значительного влияния микроорганизмов на процесс коррозии, их значительное накопление на оборудовании может несколько замедлить его ход, при этом необходимо увеличить производительность двигателей.

Морская биокоррозия чаще всего возникает в сталях и сплавах на основе никеля, алюминия, свинца и олова.

Магний и цинк не подвергаются морской биокоррозии.

Медь можно считать лучшим материалом для избежания биокоррозии, так как его ионы токсичны.

Сопротивление воды

Движущиеся судно приводит в движение массы окружающей воды и испытывает при этом реакцию со стороны воды в виде гидродинамических сил, действующих на поверхность корпуса автономного необитаемого аппарата.

Эти силы можно привести к силе $F_{гд}$, приложенной в центре тяжести аппарата (в точке G) или в любом другом центре приведения, и к паре сил с моментом $M_{гд}$, равному главному моменту гидродинамических сил относительно центра тяжести.

Составляющая F_x гидродинамической силы $F_{гд}$, направленная противоположно скорости V движения центра тяжести аппарата, называется сопротивлением воды движению необитаемого подводного аппарата. Составляющая F_z , направленная по нормали к скорости V , называется подъемной силой и при горизонтальном движении аппарата может рассматриваться как гидродинамическая сила выталкивания.

Сопротивление воды зависит от скорости аппарата, формы, размеров и состояния наружной поверхности корпуса, количества, формы и расположения выступов и углублений на корпусе, а также эксплуатационных факторов.

При исследовании и расчете сопротивления воды ее условно разбивают на составляющие, которые предполагаются независимыми друг от друга. Это деление связывает компоненты сопротивления с направлениями гидродинамических сил на поверхности (касательные и нормальные) и с основными физическими свойствами воды (вязкость и весомость). Соответственно, сила сопротивления воды движению устройства составляет:

Сила трения R_t обусловлена касательными силами, которые зависят от свойств вязкости, т.е. от числа Рейнольдса. Силы давления состоят из двух составляющих. Одну из них – силу вязкостной природы, зависящую от числа Рейнольдса, называют сопротивлением формы R_{ϕ} . Другую составляющую сил давления, зависящую от сил гравитации, т.е. от числа Фруда, называют волновым сопротивлением R_v .

2.2.2 Внутренние параметры

При разработке математической модели автономного необитаемого подводного аппарата необходимо учитывать различные внутренние параметры. К числу ключевых внутренних параметров можно отнести:

- масса и инерция;
- гидродинамические коэффициенты;
- характеристики движителей;
- емкость батарей и потребляемая мощность;
- характеристики датчиков;
- структурные свойства;
- характеристики системы связи;
- отказоустойчивость.

Рассмотрим каждый из параметров отдельно.

Масса

Масса АНПА напрямую влияет на его плавучесть и устойчивость. Она является мерой сопротивления аппарата изменениям его поступательного движения при приложении сил. Касательно массы рассмотрим два ключевых аспекта:

– Общая масса: Сумма масс корпуса, внутренних компонентов, таких как батареи, датчики, двигательные установки, и любой полезной нагрузки, которую он может нести. Общая масса влияет на требования к мощности двигательной установки и на конструкцию системы управления плавучестью для достижения нейтральной плавучести.

– Центр масс: Точка, в которой, сосредоточена общая масса АНПА. Для стабильной работы АНПА центр масс должен быть точно позиционирован, часто ниже центра плавучести, чтобы обеспечить позитивную устойчивость. Это положение влияет на то, как АНПА

наклоняется и кренится в ответ на внешние возмущения. Положение центра масс $x_{\text{цм}}$, рассчитывается по формуле (1):

$$x_{\text{цм}} = \frac{\sum m_i \cdot x_i}{\sum m_i}, \quad (1)$$

где x_i – позиции отдельных компонентов, м,

m_i – массы отдельных компонентов, кг,

i – индекс компонента.

Влияние массы на плавучесть:

Сила плавучести $F_{\text{пл}}$, действующая на АНПА, определяется по формуле (2):

$$F_{\text{пл}} = \rho_v \cdot V \cdot g, \quad (2)$$

где ρ_v – плотность воды, кг/м³,

V – объем вытесненной воды, м³,

g – ускорение свободного падения, м/с².

Для достижения нейтральной плавучести сила плавучести должна быть равна силе гравитации $F_{\text{гр}}$ (3):

$$F_{\text{гр}} = m \cdot g, \quad (3)$$

Состояние нейтральной плавучести (4):

$$F_{\text{пл}} = F_{\text{гр}} \Rightarrow \rho_v \cdot V \cdot g = m \cdot g \quad (4)$$

Инерция

Инерция описывает сопротивление АНПА изменениям его вращательного движения вокруг центра масс. Распределение массы АНПА относительно центра масс определяет его момент инерции, который влияет на динамику вращения.

Момент инерции (тензор инерции): Этот тензор представляет собой количественную меру сопротивления АНПА вращательному движению вокруг каждой из его главных осей (крен, тангаж, рысканье). Моменты инерции зависят от формы АНПА и распределения массы внутри аппарата. Высокая инерция может стабилизировать движение, но также может сделать маневры более энергоемкими.

Динамика вращения: Инерция влияет на то, как АНПА реагирует на крутящий момент и угловую скорость. Хорошо спроектированный АНПА будет иметь такое распределение массы, которое позволит ему эффективно маневрировать, сохраняя устойчивость при поворотах или изменении ориентации.

Момент инерции I вокруг оси для тела, состоящего из отдельных масс, вычисляется как (5):

$$I = \sum m_i \cdot r_i^2, \quad (5)$$

где m – масса элемента, кг,

r_i – расстояние каждого элемента от оси вращения, м,

i – индекс элемента.

Исходя из непрерывного распределения массы можно вывести тензор инерции (6):

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где x и y координаты компонент.

Уравнения Эйлера для динамики вращения вокруг центра масс выражаются как (7):

$$I \cdot \dot{\omega} + \omega \cdot (I \cdot \omega) = \tau, \quad (7)$$

где ω – вектор угловой скорости, рад/с,

τ – внешний крутящий момент, приложенный к АНПА, Н · м.

Правильный расчет и распределение массы и инерции очень важны для конструкции АНПА, влияя на все - от выбора материала для корпуса до размещения внутренних компонентов. Эти факторы имеют важное значение для разработки эффективных алгоритмов управления, которые регулируют движение и устойчивость.

Перед разворачиванием АНПА часто тестируются в симуляторах, которые в значительной степени опираются на точные модели массы и инерции. Эти модели помогают предсказать поведение АНПА в реальных условиях, что позволяет при необходимости вносить коррективы в конструкцию или систему управления.

Оптимизация параметров массы и инерции может привести к более эффективным операциям, так как АНПА может использовать меньше энергии для преодоления своих инерционных свойств во время маневров, что приводит к увеличению продолжительности миссии за счет снижения энергопотребления.

Гидродинамические коэффициенты

Гидродинамические коэффициенты количественно определяют взаимодействие аппарата с водной средой, влияя на его устойчивость, маневренность и общую производительность.

Гидродинамические коэффициенты обычно определяются с помощью экспериментальных испытаний, таких как испытания в водных резервуарах, водные туннели, или с помощью моделирования вычислительной гидродинамики.

Конструкторские решения относительно формы, размера и дополнительных частей АНПА зависят от их влияния на эти гидродинамические коэффициенты.

При моделировании эти коэффициенты используются для прогнозирования поведения АНПА в различных условиях эксплуатации, что помогает в разработке системы управления и планировании миссий.

Коэффициент сопротивления

Коэффициент сопротивления определяет сопротивление, с которым сталкивается объект при движении через воду. Это безразмерное число, которое описывает силу сопротивления в зависимости от плотности жидкости, скорости объекта и его площади соприкосновения (8):

$$F_{\text{спр}} = \frac{1}{2} C_{\text{спр}} \rho v^2 A, \quad (8)$$

где $F_{\text{спр}}$ – сила сопротивления, Н,

$C_{\text{спр}}$ – коэффициент сопротивления,

ρ – плотность жидкости, кг/м³,

v – скорость АНПА относительно воды, м/с

A – контрольная площадь (обычно площадь поперечного сечения АНПА), м².

Коэффициент подъемной силы

Коэффициент подъемной силы измеряет подъемную силу, создаваемую телом, движущимся через жидкость (9):

$$F_{\text{под}} = \frac{1}{2} C_{\text{под}} \rho v^2 A, \quad (9)$$

где $F_{\text{под}}$ – подъемная сила, Н

$C_{\text{под}}$ – коэффициент подъемной силы,

ρ – плотность жидкости, кг/м³,

v – скорость АНПА относительно воды, м/с,

A – контрольная площадь (обычно площадь поперечного сечения АНПА), м².

Коэффициенты добавочной массы

Коэффициенты добавочной описывают дополнительные инерционные силы, которые испытывает тело, движущееся в жидкости, из-за того, что жидкость ускоряется вместе с телом (10):

$$F_{\text{доб}} = -C_{\text{доб}} \rho V a \quad (10)$$

где $C_{\text{доб}}$ – коэффициент добавленной массы,

V – перемещаемый объем, м³,

a – ускорение аппарата, м/с².

Коэффициенты тангажа и рысканья

Эти коэффициенты измеряют сопротивление угловым движениям вокруг вертикальной и горизонтальной осей соответственно. Критически важны для прогнозирования и управления вращательным поведением АНПА при различных сценариях маневрирования.

Характеристики движителей

Характеристики движителей автономного необитаемого подводного аппарата включают в себя несколько важнейших аспектов, которые определяют способность аппарата маневрировать в воде.

Тяга

Это сила, создаваемая двигательной установкой для перемещения АНПА по воде. Это параметр влияет на скорость и маневренность АНПА (11):

$$F_{\text{тяги}} = \dot{m}v_{\text{вд}}, \quad (11)$$

где $F_{\text{тяги}}$ – сила тяги, Н,

$\dot{m}$ – скорость изменения массы воды, кг/с,

$v_{\text{вд}}$ – скорость воды на выходе системы, м/с.

Эффективность движителя

Эффективность движителя, часто называемая пропульсивной эффективностью, измеряет, насколько эффективно пропульсивная система преобразует входную мощность в полезную тягу (12):

$$\eta = (F_{\text{тяги}} \cdot v) / P, \quad (12)$$

где η – эффективность движителя,

$F_{\text{тяги}}$ – создаваемая тяга, Н,

v – скорость АНПА, м/с,

P – мощность потребляемая двигательной установкой, Вт.

Маневренность

Маневренность означает способность АНПА изменять свое положение и ориентацию в ответ на команды управления (повороты и регулировку глубины).

Радиус и скорость поворота (13):

$$R = (v^2) / (g \cdot \tan(\phi)), \quad (13)$$

где R – радиус поворота, м,

v – скорость АНПА, м/с,

g – ускорение под действием силы тяжести, м/с²,

ϕ – угол крена, или угол наклона во время поворота, °.

Динамика тангажа и рысканья (14):

$$\dot{\theta} = \frac{M_{\text{угл}}}{I}, \quad (14)$$

где $\dot{\theta}$ – скорость изменения угла тангажа или рысканья, рад/с,

$M_{\text{угл}}$ – приложенный крутящий момент, Н·м,

I – момент инерции относительно оси тангажа или рысканья, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Батарея

Емкость аккумулятора и энергопотребление – важные параметры при разработке и эксплуатации автономных необитаемых подводных аппаратов. Они определяют продолжительность работы и эффективность аппарата во время миссий.

Емкость аккумулятора

Емкость батареи — это мера общего количества энергии, хранящейся в батарее, обычно выраженная в ампер-часах (А/ч) или ватт-часах (Вт/ч). Она указывает на максимальную энергию, доступную для питания АНПА в течение определенного периода времени (15):

$$E = C \cdot V, \quad (15)$$

где E — общая энергоемкость батареи, Вт/ч,

C – емкость батареи, А/ч,

V – номинальное напряжение батареи, В.

Потребляемая мощность

Потребляемая мощность АНПА — это скорость, с которой АНПА использует энергию для выполнения своих функций, включая движение, навигацию и работу бортовых систем и датчиков (16).

$$P = I \cdot V, \quad (16)$$

где P – потребляемая мощность, Вт,

I – ток потребляемый АНПА, А,

V – напряжение, при котором работает АНПА, В.

Сенсоры

Характеристики датчиков оказывают непосредственное влияние на навигацию, сбор данных и взаимодействие с подводной средой.

Ниже приведены те характеристики, которые должны быть учтены при отборе и тестировании датчиков. Это гарантирует, что АНПА сможет эффективно выполнять поставленные перед ним задачи. Точные датчики повышают способность АНПА ориентироваться, избегать препятствий и собирать данные.

Точность и повторяемость

Точность характеризует близость измерений, выполненных датчиком, к истинному значению, а повторяемость отражает изменчивость измерений в одних и тех же условиях (17):

$$\text{Точность} = |\text{Реальное значение} - \text{Измеренное значение}|. \quad (17)$$

Точность определяет, насколько близко измеренное значение к фактическому.

Чувствительность

Чувствительность — это способность датчика обнаруживать изменения или реагировать на стимул. Часто ее определяют как отношение изменения выходного сигнала к изменению измеряемой величины (18):

$$S = \frac{\Delta O}{\Delta I}, \quad (18)$$

где S — чувствительность датчика,

ΔO — изменение выходного сигнала,

ΔI — изменение входного сигнала или измеряемой величины.

Диапазон и разрешение

Диапазон — максимальное и минимальное значения входного сигнала, которые датчик может точно определить.

Разрешение — наименьшее обнаруживаемое приращение измерения, которое датчик может обнаружить в пределах своего диапазона (19):

$$R = \frac{M}{2^n} \quad (19)$$

где R — разрешение,

M — максимальное выходное значение датчика,

n — количество бит в цифровом выходе датчика (применяется для цифровых датчиков).

Время отклика

Время отклика — это время, необходимое датчику для реагирования на изменение измеряемого явления от начального до конечного состояния, обычно определяемое как время, необходимое для достижения определенного процента (обычно 90%) от общего изменения (20):

$$\tau = -\frac{t}{\ln(1 - P)}, \quad (20)$$

где τ — постоянная времени датчика, с,

t — наблюдаемый период времени, с,

P — процент от конечного значения, которого достигает выход датчика (выражается десятичной дробью).

Робастность

Надежность датчиков означает их способность точно работать в различных условиях окружающей среды без сбоев, например, при высоком давлении, перепадах температуры и коррозионных условиях, характерных для подводных условий.

Конструктивные свойства

Конструктивные свойства влияют на обеспечение механической целостности и работоспособности автономных необитаемых подводных аппаратов в условиях экстремального давления и коррозионной среды глубоководных операций. Эти свойства включают в себя прочность материала, проектные спецификации и анализ напряжений для обеспечения долговечности и надежности.

Прочность материала и усталость

Прочность материала — это способность материала выдерживать механические нагрузки без разрушения, в то время как усталость описывает ослабление материала, вызванное многократным приложением нагрузки.

Математическое выражение для анализа напряжений (21):

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (21)$$

где σ — напряжение, испытываемое материалом, Па,

F — сила, приложенная к материалу Н,

A — площадь поперечного сечения материала, м².

Расчет усталостной долговечности (22):

$$N_f = \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_f} \right)^{-b} \cdot 10^c, \quad (22)$$

где N_f — количество циклов до разрушения (усталостная долговечность),

σ_a — амплитуда напряжения, Н/м²,

σ'_f — коэффициент усталостной прочности, Н/м²,

b и c — константы, зависящие от материала, обычно определяемые по экспериментальным данным.

Смятие

Анализ на смятие определяет критическую нагрузку, при которой элемент конструкции (например, балки в раме АНПА) разрушится из-за неустойчивости под действием сжимающего напряжения.

Математическое выражение (23):

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}, \quad (23)$$

где $P_{кр}$ — критическая нагрузка на смятие, Н,

E — модуль упругости материала, Н/м²,

I — момент инерции поперечного сечения, м⁴,

K – коэффициент эффективной длины, зависящий от конечных условий,

L – длина, м.

Коррозионная стойкость

Коррозионная стойкость — это способность материала противостоять разрушению под воздействием окружающей среды, например, соленой воды.

Математическое моделирование скорости коррозии (24):

$$R_c = k \cdot e^{-\alpha c}, \quad (24)$$

где R_c – скорость коррозии, мм/год,

k и α – константы, зависящие от материала и окружающей среды, кг/м³,

c – концентрация коррозионного агента, м³/кг.

Анализ корпуса под давлением

Анализ корпуса АНПА под давлением включает оценку структурной целостности корпуса под внешним гидростатическим давлением для предотвращения разрушения или взрыва.

Математическое выражение для напряжений в корпусе АНПА (25):

$$\sigma_h = \frac{p_d D}{2t}, \quad (25)$$

где σ_h – напряжение в корпусе аппарата, Па,

p_d – расчетное давление, обычно внешнее давление воды, Па,

D – диаметр корпуса аппарата, м

t – толщина материала корпуса, м.

Анализ вибрации

Анализ вибрации изучает реакцию конструкции АНПА на колебательные силы, которые могут повлиять на датчики и эксплуатационные характеристики АНПА.

Математическая формулировка с использованием модального анализа (26):

$$\omega_c = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (26)$$

где ω_c – собственная частота системы, рад/с,

k – жесткость конструкции, Н/м,

m – масса, кг.

Система связи

Система связи автономного необитаемого подводного аппарата необходима для передачи данных, приема команд и оперативного мониторинга. Эти системы должны преодолевать уникальные проблемы подводной связи, такие как:

- высокое затухание сигнала;
- ограниченная полоса пропускания;
- шум окружающей среды.

Учет и правильная настройка этих параметров влияет на повышение надежности и эффективности систем связи АНПА. Эти математические модели используются для разработки протоколов связи и аппаратных средств, которые могут эффективно работать в подводной среде.

Затухание сигнала

Затухание сигнала — это уменьшение силы сигнала при прохождении через среду, что особенно сильно проявляется в подводной среде из-за эффектов поглощения и рассеяния.

Математическое выражение (27):

$$A(d, f) = A_0 e^{-\alpha(f)d}, \quad (27)$$

где A – амплитуда сигнала, м/с,

d – расстояние, м,

f – частота, Гц,

A_0 – начальная амплитуда сигнала, м/с,

$\alpha(f)$ – коэффициент затухания, который зависит от частоты сигнала, м⁻¹

d – расстояние, на которое сигнал проходит через воду, м.

Ограничения пропускной способности

Полоса пропускания в подводных системах связи ограничена из-за частотно-зависимого поглощения звука в воде.

Математическое выражение (28):

$$B(f) = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N(f)} \right), \quad (28)$$

где $B(f)$ – пропускная способность полосы пропускания на частоте f , бит / (с · Гц)

S – мощность сигнала, Вт,

$N(f)$ – мощность шума на частоте f , которая увеличивается с ростом частоты, Вт.

Многопутевое распространение

Многопутевое распространение возникает, когда сигналы отражаются от различных подводных поверхностей (например, от морского дна и поверхности), что приводит к появлению множества путей прохождения сигнала, которые могут создавать конструктивные или деструктивные помехи.

Математическое выражение (29):

$$y(t) = \sum_{i=1}^n x(t - \tau_i) h_i + n(t), \quad (29)$$

где $y(t)$ - принятый сигнал,

$x(t)$ – переданный сигнал,

τ_i – временные задержки для каждого пути, с,

h_i – коэффициенты усиления трактов,

$n(t)$ – шумовой сигнал,

n – количество путей.

Пропускная способность акустического канала

Пропускная способность канала акустической системы связи — это максимальная скорость, с которой информация может быть надежно передана по каналу связи при определенных условиях.

Математическое выражение (30):

$$C = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \log_2 \left(1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df, \quad (30)$$

где C – пропускная способность канала,

$f_{\min}$ и $f_{\max}$ – минимальная и максимальная частоты доступной полосы пропускания,

$S(f)$ и $N(f)$ – спектральные плотности мощности сигнала и шума на частоте f .

Вероятность ошибки в цифровой связи

Вероятность ошибки — это вероятность того, что бит, переданный по каналу, будет принят неверно.

Математическое выражение (31):

$$P_e = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right), \quad (31)$$

где P_e – вероятность ошибки,

$Q(x)$ – Q-функция,

E_b – энергия на бит, Дж,

N_0 – спектральная плотность шума, Дж.

Отказоустойчивость

Отказоустойчивость в АНПА означает способность систем аппарата продолжать корректно работать в случае отказа некоторых его компонентов. Эта характеристика важна для поддержания надежности и безопасности в сложных подводных условиях, когда техническое обслуживание или немедленное вмешательство невозможны.

Приведенные ниже модели используются для разработки и оценки отказоустойчивости систем АНПА, гарантируя, что они могут противостоять отказам и автономно восстанавливаться после них.

Избыточность

Избыточность — это включение дополнительных компонентов, которые не обязательно требуются для нормальной работы, но могут заменить основной компонент в случае его выхода из строя.

Математическое выражение для надежности системы (32):

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i), \quad (32)$$

где R_s — надежность системы,

R_i — надежность i -го компонента,

n — количество резервных компонентов.

Разнообразие

Разнообразие подразумевает использование различных методов или компонентов для достижения одной и той же функциональности, что защищает от общего вида отказов, влияющих на все аналогичные компоненты.

Математическая модель надежности с учетом разнообразия (33):

$$R_d = 1 - \prod_{j=1}^m \left(1 - \prod_{i=1}^{n_j} R_{ij} \right) \quad (33)$$

где R_d — общая надежность с разнообразным резервированием,

R_{ij} — надежность i -го компонента в j -й группе с разнообразным резервированием,

n_j — количество компонентов в j -й группе,

m — количество разнообразных групп.

Обнаружение и изоляция неисправностей

Методы обнаружения и изоляции неисправностей подразумевают определение типа и местоположения неисправности и ее изоляцию от остальной части системы для предотвращения дальнейшей деградации.

Математическая формулировка обнаружения неисправностей (34)

$$\begin{cases} y = Cx + Du + v \\ \hat{x} = Ax + Bu + L(y - \hat{y}) \end{cases} \quad (34)$$

где y — выходной вектор,

x — вектор состояния,

u — входной вектор,

C, D, A, v – шум измерений,

$\hat{x}$ – оцененный вектор состояния,

$\hat{y}$ – оцениваемый выход,

L – матрица коэффициента усиления наблюдателя, используемого в оценке.

Восстановление после сбоев

Восстановление после сбоя включает в себя стратегии возвращения системы в безопасное рабочее состояние после возникновения неисправности или отказа.

Математическая модель действий по восстановлению (35):

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Kf(t), \quad (35)$$

где $x(t+1)$ – состояние системы на следующем временном шаге,

$x(t)$ – текущее состояние системы,

$u(t)$ – управляющий вход,

$f(t)$ – воздействие неисправности,

K – матрица восстановительных действий, направленных на устранение неисправности.

Инжиниринг надежности

Инженерия надежности включает в себя проектирование и эксплуатацию систем таким образом, чтобы они соответствовали требуемым уровням надежности.

Количественный анализ надежности (36):

$$C = \frac{1}{\lambda}, \quad (36)$$

где C – среднее время наработки на отказ,

λ – интенсивность отказов в единицу времени.

2.2.3 Внешние факторы и окружающая среда

В данном разделе рассматриваются внешние факторы, влияющие на АНПА. Так же рассмотрено влияние окружающей среды на аппарат. Особое внимание уделяется трём основным категориям факторов: технико-экономическим, природным ресурсам и экологической безопасности.

Технико-экономические факторы

Уровень промышленного производства

Уровень промышленного производства может существенно влиять на разработку и эксплуатацию автономных необитаемых подводных аппаратов. Для математического описания этого влияния введем несколько переменных и уравнений, моделирующих зависимости между уровнем промышленного производства и характеристиками АНПА.

Определим переменные.

P – уровень промышленного производства, который может быть измерен через агрегатные показатели валовой промышленной продукции, индекс промышленного производства или индекс промышленных заказов.

C_t – стоимость технологий производства АНПА, руб.

Q_t – качество и надежность технологий производства, %.

T – время, необходимое для разработки и внедрения новых технологий в производство АНПА, с.

R – степень готовности рынка к новым технологиям, %.

Представим взаимосвязь между уровнем промышленного производства P и стоимостью технологий C , используя функцию экономии от масштаба (37):

$$C_t = C_0 e^{-\alpha P} \quad (37)$$

где α – параметр, отражающий степень влияния промышленного уровня на снижение затрат.

Качество и надежность технологий Q_t связаны с уровнем промышленного производства посредством логистической функции (38):

$$Q_t = \frac{Q_{max}}{1 + e^{-\beta(P-P_0)}} \quad (38)$$

где Q_{max} – максимально возможное качество,

β – параметр, характеризующий скорость улучшения качества,

P_0 – уровень производства, при котором достигается 50% от максимального качества.

Время T для разработки и внедрения новых технологий может быть обратно пропорционально уровню промышленного производства (39):

$$T = \frac{T_0}{P^\gamma} \quad (39)$$

где T_0 – время разработки при минимальном уровне производства, с,

γ – коэффициент, отражающий, как увеличение уровня промышленного производства ускоряет разработку.

Совокупное воздействие этих факторов на функцию стоимости и эффективности F АНПА можно описать следующим уравнением (40):

$$F(P) = \frac{\lambda_1 C_t + \lambda_2 (1 - Q_t) + \lambda_3 T}{R} \quad (40)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – весовые коэффициенты для стоимости, качества и времени соответственно,

R – коэффициент, отражающий адаптацию рынка к новым технологиям.

С помощью этой модели можно количественно оценить, как изменения в промышленном производстве могут влиять на параметры разработки и эксплуатации автономных необитаемых подводных аппаратов.

Состояние технологии производства

Состояние технологии производства может влиять на различные аспекты, такие как стоимость производства, надежность и возможности аппаратов, а также на их энергоэффективность и техническое обслуживание.

Для количественного анализа влияния состояния технологии производства S на АНПА введем следующие параметры и уравнения:

Надежность аппарата R : Надежность аппарата может быть функцией технологического уровня производства, который может включать в себя последние достижения в материаловедении, электронике и механике. Модель может быть представлена как (41):

$$R(S) = 1 - e^{-\lambda S} \quad (41)$$

где λ — параметр, показывающий чувствительность надежности к улучшению технологий.

S измеряется в баллах на шкале технологического развития.

Стоимость производства C : Стоимость производства АНПА обратно пропорциональна технологическому уровню, так как совершенствование технологий позволяет сокращать затраты на материалы, сборку и тестирование (42):

$$C(S) = \frac{C_0}{1 + \delta S} \quad (42)$$

где C_0 — начальная стоимость при базовом уровне технологий, руб,

δ — коэффициент, отражающий степень снижения затрат при улучшении технологий.

Энергоэффективность E : Энергоэффективность улучшается с развитием технологий, особенно в области энергосбережения и управления ресурсами (43):

$$E(S) = kS^\eta \quad (43)$$

k — коэффициент пропорциональности, фиксирует точку «отсчёта» шкалы энергоэффективности,

η — показатель степени, характеризующий скорость изменения энергоэффективности по отношению к изменению масштаба.

Общая функция оценки технологического воздействия T : Все эти факторы могут быть интегрированы в общую функцию, которая оценивает влияние технологического состояния на общую производительность и эффективность АНПА (44):

$$T(S) = \omega_1 R(S) + \omega_2 \left(\frac{1}{C(S)} \right) + \omega_3 E(S) \quad (44)$$

Эти модели помогают оценить, как передовые технологии могут повлиять на производительность, надежность и стоимость автономных необитаемых подводных аппаратов, что имеет важное значение для их проектирования и эксплуатации.

Природные ресурсы

Природные ресурсы, например, запасы лития и обеспечение экологической безопасности, играют ключевую роль в проектировании и эксплуатации автономных необитаемых подводных аппаратов. Влияние этих факторов на разработку и использование АНПА рассмотрено в данном разделе.

Доступность лития напрямую влияет на производство и стоимость литий-ионных батарей, которые широко используются в АНПА (45):

$$B(L) = \frac{\mu L}{1 + \nu(L_0 - L)} \quad (45)$$

где L – текущие запасы лития, кг,

μ и ν – параметры, моделирующие зависимость производства батарей от доступности лития,

L_0 – пороговый запас лития, ниже которого дальнейшее производство аккумуляторных батарей утрачивает эффективность, кг.

Экологическая безопасность оценивается через потенциальное воздействие АНПА на подводную среду (46):

$$S(E, C) = \eta \left(\frac{E}{C} \right)^{-\sigma} \quad (46)$$

где E – энергопотребление АНПА, Дж,

C – вредные выбросы или отходы, связанные с его использованием, Дж,

η и σ – коэффициенты, отражающие влияние энергопотребления и загрязнения на экологическую устойчивость.

Общее влияние природных ресурсов на АНПА может быть выражено через суммарную функцию (47):

$$F(L, E, C) = \omega_1 B(L) + \omega_2 S(E, C) \quad (47)$$

где ω_1 и ω_2 – весовые коэффициенты отражают относительную значимость производственного потенциала аккумуляторных батарей, обусловленного доступностью лития, и их экологической устойчивости.

2.2.4 Управляющие воздействия

Система управления

Параметры системы управления являются неотъемлемой частью эксплуатационной эффективности и стабильности автономных необитаемых подводных аппаратов. Эти параметры определяют, насколько хорошо АНПА может выдерживать курс, глубину и взаимодействовать с подводной средой.

Эти параметры системы управления, при правильной настройке и реализации, позволяют автономным аппаратам выполнять сложные задачи в сложных подводных условиях.

ПИД-регуляторы

ПИД-регуляторы являются основополагающими в системах управления АНПА, обеспечивая расчетное корректирующее действие через механизм обратной связи в контуре управления (48):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (48)$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие в момент времени t ,

K_p , K_i , K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты, соответственно,

$e(t)$ – ошибка между желаемой уставкой и измеренной переменной процесса,

t – время, с,

τ – фиктивная переменная интегрирования.

Управление с обратной связью по состоянию

Управление с обратной связью по состоянию использует измерения всех переменных состояния для вычисления управляющих входов, которые приведут состояние к желаемым значениям (49):

$$u = -Kx, \quad (49)$$

где u – вектор управляющих входов,

K – матрица коэффициентов усиления обратной связи,

x – вектор переменных состояния (например, положение, скорость).

Наблюдатель состояния

Наблюдатели используются в системах управления, когда все переменные состояния не поддаются прямому измерению. Они оценивают состояния на основе выходов и управляющего входа (50):

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}), \quad (50)$$

где $\hat{x}$ – оценка вектора состояния,

A, B, C – матрицы системы, определяющие динамику, входные воздействия и выходные связи, соответственно,

u – вектор управляющих воздействий,

L – матрица коэффициента усиления для наблюдателя,

y – выходной вектор.

Критерии устойчивости по Ляпунову

Критерии устойчивости Ляпунова предоставляют метод обеспечения глобальной устойчивости в системах управления, не требуя решения уравнений системы.

Математическое выражение (51):

$$\dot{V}(x) \leq 0, \quad (51)$$

где $\dot{V}(x)$ – производная по времени от функции Ляпунова, которая должна быть неположительной для обеспечения устойчивости.

Робастное управления

При проектировании робастного управления учитывается неопределенность параметров системы управления и внешние возмущения, что позволяет поддерживать эффективность в различных условиях (52):

$$\|\Delta\| < 1 \quad \& \quad \|T(s)\|_{\infty} < \gamma, \quad (52)$$

где Δ представляет собой блок неопределенности в системе,

$T(s)$ – передаточная функция от возмущения к выходу,

γ – заданная граница, а

$\|T(s)\|_{\infty}$ обозначает норму Н-бесконечности, отражающую наихудшее усиление системы.

2.2.5 Выходные параметры

Рассмотрим выходные параметры концептуальной модели автономного необитаемого подводного аппарата

- вектор движения;
- глубина погружения;
- ориентация;
- состояние системы;
- коммуникационные сигналы.

Вектор движения АНПА можно описать с помощью векторных и скалярных уравнений, учитывающих силы, действующие на аппарат, и его динамические характеристики. Основное уравнение движения (53):

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \nabla P + \vec{f}_{\text{сопр}} + \vec{b} \quad (53)$$

где m – масса аппарата, кг,

$\vec{F}$ – сумма внешних сил (например, гидродинамические силы), Н,

∇P – градиент давления воды, Н,

$\vec{f}_{\text{сопр}}$ – сила сопротивления, Н,

$\vec{b}$ – сила Архимеда (плавучесть), Н.

Глубина погружения может быть описана как функция времени и управляющих воздействий, учитывая плавучесть и вес аппарата (54):

$$\frac{dD}{dt} = v_z - \frac{(\rho_v V - m)g}{m} \quad (54)$$

где v_z – вертикальная составляющая скорости аппарата, м/с,

ρ_v – плотность воды, кг/м³,

V – объем аппарата, м³,

g – ускорение свободного падения, м/с².

Ориентация АНПА описывается с помощью углов Эйлера или кватернионов, что позволяет точно определить его положение относительно трех осей в пространстве. Это особенно важно для задач, требующих точной манипуляции или стабилизации положения (55):

$$\begin{cases} q = (q_0, q_1, q_2, q_3)^T \\ \dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes \omega \end{cases} \quad (55)$$

где q – кватернион ориентации,

ω – угловая скорость, рад/с,

$\otimes$ – обозначает операцию произведения кватернионов. Эта формулировка позволяет интегрировать угловую скорость для обновления ориентации.

Состояние системы охватывает мониторинг всех ключевых компонентов аппарата, таких как двигатели, датчики, системы питания и связи. Это позволяет своевременно реагировать на возможные неисправности или изменения в рабочем состоянии (56):

$$\begin{cases} s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T \\ \dot{s}(t) = As(t) + Bu(t) \end{cases} \quad (56)$$

где $s(t)$ – вектор состояния системы,

A – матрица системных коэффициентов,

B – матрица управления,

$u(t)$ – управляющие воздействия.

Стабильность и надежность коммуникационных сигналов критически важны для управления АНПА, особенно в условиях, где требуется удаленное управление или передача больших объемов данных (57):

$$c(t) = \sum_{i=1}^N h_i(t) * x_i(t) + n(t) \quad (57)$$

где $c(t)$ – принятый сигнал,

$h_i(t)$ – импульсная характеристика канала связи для i -го сигнала, $*$ обозначает свертку,

$x_i(t)$ – отправленный сигнал,

$n(t)$ – шум.

Эти параметры формируют основу для комплексной системы управления и навигации АНПА, позволяя ему эффективно функционировать в сложных подводных условиях. Моделируя и контролируя ориентацию, состояние систем и коммуникационные сигналы, вектор движения и глубину погружения можно значительно улучшить надежность и производительность аппарата.

2.3 Обоснование значимых параметров АНПА

Для построения концептуальной модели автономного необитаемого подводного аппарата используется корреляционный анализ, который позволяет определить зависимость между переменными и их значимость. Оценки являются индивидуальными и основываются на мнении отдельных экспертов. Принцип подбора экспертной комиссии следующий: эксперты должны обладать практическим и исследовательским опытом в области подводной робототехники и морских технологий. При выборе экспертов важно учитывать их профессиональную компетентность, личную заинтересованность в результатах экспертной работы и конформность.

На электронную почту каждого эксперта отправляется письмо, содержащее таблицу с техническими параметрами АНПА и сопровождающим текстом примерно следующего вида: «Доброго времени суток! Я, Котов Дмитрий Дмитриевич, являюсь аспирантом Санкт-Петербургского горного университета кафедры Системного анализа и управления по специальности 2.3.1 (Системный анализ, управление и обработка информации, статистика). В процессе обучения я занимаюсь научной деятельностью в области разработки автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). В рамках диссертационной работы я разрабатываю информационно-управляющую систему (ИУС) АНПА, но для начала необходимо составить концептуальную модель, для которой нужно определить влияние всех параметров с помощью экспертной оценки (для дальнейшего расчета коэффициента корреляции). Для более точного

представления мне нужно мнение реальных экспертов, занимающихся данной проблематикой. Поэтому я буду рад, если вы поможете мне с выставлением экспертной оценки. Во вложениях я прикрепил таблицу, где перечислил основные (на мой взгляд) параметры. Прошу Вас направить эту таблицу сотруднику, который в качестве эксперта смог бы присвоить им ранг в зависимости от их влияния на технологический процесс. Если я вдруг что-то упустил буду рад Вашим комментариям! Заранее спасибо!»

В качестве ответа ожидается заполненная таблица и/или комментарии по проделанной работе. Проводя оценку степени значимости параметров, эксперт присваивает им ранговый номер по шкале от 1 до 10, где оценки имеют следующий смысл:

Незначительная важность 1 – 3;

Малозначительная важность 4 – 5;

Значительный 6 – 7;

Важный 8 – 10.

Эксперт может признать несколько факторов равнозначными, тогда им присваивается одинаковый ранговый номер. Таблицы, заполненные экспертами, представлены в приложении 1 «Экспертные оценки». На основе полученных от экспертов оценок формируется сводная матрица (Таблица 2).

В матрице имеются связанные ранги в оценках экспертов, поэтому необходимо произвести их переформирование. Переформирование рангов происходит без изменения мнения экспертов, то есть между ранговыми номерами должны сохраниться соответствующие соотношения (больше, меньше или равно). Значение ранга выше 1 и ниже значения равному количеству параметров, в данном случае $n = 48$, ставить не рекомендуется.

Таблица 2 - Сводная матрица оценок экспертов (составлено автором)

№	Эксперт №1	Эксперт №2	Эксперт №3	Эксперт №4	Эксперт №5
1	9	6	5	7	7
2	8	5	7	4	8
3	7	4	5	3	9
4	7	5	6	4	10
5	10	7	9	8	6
6	9	7	8	7	5
7	6	4	7	3	8
8	5	3	6	2	7
9	9	6	5	7	4
10	8	8	10	9	5

Продолжение таблицы 2

11	7	8	7	10	4
12	9	7	6	8	5
13	8	6	5	9	3
14	7	6	5	8	4
15	7	5	4	9	3
16	8	10	7	10	5
17	8	10	6	10	4
18	8	9	6	10	5
19	7	10	5	8	4
20	6	9	4	7	3
21	5	8	4	8	3
22	5	8	4	8	3
23	5	8	4	8	3
24	4	9	3	7	2
25	5	8	6	8	4
26	5	4	10	6	6
27	4	3	9	5	5
28	5	4	10	6	5
29	6	4	10	6	6
30	5	4	9	5	5
31	4	7	3	6	2
32	4	6	3	6	2
33	4	6	3	6	2
34	4	7	3	6	2
35	4	7	3	6	2
36	6	9	5	10	4
37	5	8	4	9	3
38	5	9	4	10	3
39	6	8	4	10	4
40	7	6	5	9	5
41	6	7	6	8	4
42	3	4	2	3	9

Продолжение таблицы 2

43	3	2	3	2	10
44	8	7	5	9	6
45	10	7	8	9	7
46	8	6	5	10	4
47	6	8	5	9	5
48	5	8	4	8	4

Процесс перестроения рангов включает несколько шагов:

- сортировка параметров по оценкам эксперта;
- поиск одинаковых оценок и распределение их средних рангов.

Изначально имеем следующие оценки от эксперта №1:

Эксперт №1: [9, 8, 7, 7, 10, 9, 6, 5, 9, 8, 7, 9, 8, 7, 7, 8, 8, 8, 7, 6, 5, 5, 5, 4, 5, 5, 4, 5, 6, 5, 4, 4, 4, 4, 4, 6, 5, 5, 6, 7, 6, 3, 3, 8, 10, 8, 8, 6, 5]

Сортируем оценки и затем рассчитаем ранги для одинаковых оценок.

Пример расчёта для первых нескольких параметров:

Параметры с оценкой 3 будут иметь два значения (43, 44), соответственно их ранги будут $(1+2)/2 = 1.5$

Параметры с оценкой 4 будут иметь шесть значений (24, 27, 31, 32, 33, 34, 35), соответственно их ранги будут $(3+4+5+6+7+8+9)/7 \approx 6$

Теперь проведем полный расчет для всех параметров.

Данное значение считается рангом и присваивается всем параметрам в области одинаковой оценки. В таблице 3 приведено перестроение для одного эксперта.

Таблица 3 - Определение рангов, исходя из оценок (составлено автором)

№	Параметры АНПА	Значение	Ранг
42	Запасы лития	3	1
43	Экологическая безопасность	3	
24	Время отклика	4	3
27	Усталость	4	
31	Затухание сигнала	4	
32	Ограничения пропускной способности	4	
33	Многопутевое распространение	4	
34	Пропускная способность акустического канала	4	
35	Вероятность ошибки в цифровой связи	4	

Продолжение таблицы 3

8	Биологическое воздействие воды	5	10
21	Точность и повторяемость	5	
22	Чувствительность	5	
23	Диапазон и разрешение	5	
25	Робастность	5	
26	Прочность	5	
28	Стойкость к смятию	5	
30	Стойкость к вибрациям	5	
37	Разнообразие	5	
38	Обнаружение и изоляция неисправностей	5	
48	Коммуникационные сигналы	5	21
7	Химическое воздействие воды	6	
20	Потребляемая мощность	6	
29	Стойкость к высокому давлению	6	
36	Избыточность	6	
39	Восстановление после сбоев	6	
41	Состояние технологии производства	6	
47	Состояние системы	6	28
3	Соленость воды	7	
4	Температура воды	7	
11	Инерция	7	
14	Коэффициенты добавочной массы	7	
15	Коэффициенты тангажа и рысканья	7	
19	Емкость аккумулятора	7	
40	Инжиниринг надежности	7	
2	Плотность воды	8	35
10	Масса	8	
13	Коэффициент подъемной силы	8	
16	Тяга	8	
17	Эффективность двигателя	8	
18	Маневренность	8	
44	Вектор движения	8	

Продолжение таблицы 3

46	Ориентация в пространстве	8	35
1	Подводные течения	9	43
6	Ударные нагрузки	9	
9	Сопротивление воды	9	
12	Коэффициент сопротивления	9	
5	Гидростатические нагрузки	10	47
45	Глубина погружения	10	

Подобным образом оценки переформируются в ранги для всех экспертов, а затем формируется сводная таблица рангов (Таблица 4).

Таблица 4 - Сводная таблица рангов экспертов (составлено автором)

№	Эксперт №1	Эксперт №2	Эксперт №3	Эксперт №4	Эксперт №5
1	43	14	18	18	40
2	35	11	36	6	43
3	28	4	18	3	45
4	28	11	29	6	47
5	47	22	42	23	36
6	43	22	40	18	26
7	21	4	36	3	43
8	10	2	29	1	40
9	43	14	18	18	15
10	35	31	45	33	26
11	28	31	36	41	15
12	43	22	29	23	26
13	35	14	18	33	7
14	28	14	18	23	15
15	28	11	9	33	7
16	35	46	36	41	26
17	35	46	29	41	15
18	35	41	29	41	26
19	28	46	18	23	15
20	21	41	9	18	7
21	10	31	9	23	7

Продолжение таблицы 4

22	10	31	9	23	7
23	10	31	9	23	7
24	3	41	2	18	1
25	10	31	29	23	15
26	10	4	45	10	36
27	3	2	42	8	26
28	10	4	45	10	26
29	21	4	45	10	36
30	10	4	42	8	26
31	3	22	2	10	1
32	3	14	2	10	1
33	3	14	2	10	1
34	3	22	2	10	1
35	3	22	2	10	1
36	21	41	18	41	15
37	10	31	9	33	7
38	10	41	9	41	7
39	21	31	9	41	15
40	28	14	18	33	26
41	21	22	29	23	15
42	1	4	1	3	45
43	1	1	2	1	47
44	35	22	18	33	36
45	47	22	40	33	40
46	35	14	18	41	15
47	21	31	18	33	26
48	10	31	9	23	15

Далее рассчитаем отклонение суммы рангов от средней арифметической суммы рангов по формуле (58):

$$d^2 = \left(R_i - \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \right)^2 \quad (58)$$

где d^2 – квадрат отклонения суммы рангов для i -й категории от её среднего значения,
 R_i – фактическая сумма рангов, присвоенных i -й категории.

Результаты отклонения для каждой категории представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Сводная таблица среднеквадратичного отклонения (составлено автором)

№	Эксперты					Σ	d	d^2
	№1	№2	№3	№4	№5			
1	43	14	18	18	40	134	2,63	6,89
2	35	11	36	6	43	133	1,63	2,64
3	28	4	18	3	45	101	-30,38	922,64
4	28	11	29	6	47	125	-6,38	40,64
5	47	22	42	23	36	175	43,63	1903,14
6	43	22	40	18	26	155	23,63	558,14
7	21	4	36	3	43	114	-17,38	301,89
8	10	2	29	1	40	90	-41,38	1711,89
9	43	14	18	18	15	117	-14,38	206,64
10	35	31	45	33	26	180	48,63	2364,39
11	28	31	36	41	15	162	30,63	937,89
12	43	22	29	23	26	155	23,63	558,14
13	35	14	18	33	7	120	-11,38	129,39
14	28	14	18	23	15	112	-19,38	375,39
15	28	11	9	33	7	103	-28,38	805,14
16	35	46	36	41	26	200	68,63	4709,39
17	35	46	29	41	15	183	51,63	2665,14
18	35	41	29	41	26	190	58,63	3436,89
19	28	46	18	23	15	149	17,63	310,64
20	21	41	9	18	7	116	-15,38	236,39
21	10	31	9	23	7	101	-30,38	922,64
22	10	31	9	23	7	102	-29,38	862,89
23	10	31	9	23	7	103	-28,38	805,14
24	3	41	2	18	1	89	-42,38	1795,64
25	10	31	29	23	15	133	1,63	2,64
26	10	4	45	10	36	131	-0,38	0,14
27	3	2	42	8	26	108	-23,38	546,39
28	10	4	45	10	26	123	-8,38	70,14
29	21	4	45	10	36	145	13,63	185,64

Продолжение таблицы 5

30	10	4	42	8	26	120	-11,38	129,39
31	3	22	2	10	1	69	-62,38	3890,64
32	3	14	2	10	1	62	-69,38	4812,89
33	3	14	2	10	1	63	-68,38	4675,14
34	3	22	2	10	1	72	-59,38	3525,39
35	3	22	2	10	1	73	-58,38	3407,64
36	21	41	18	41	15	172	40,63	1650,39
37	10	31	9	33	7	127	-4,38	19,14
38	10	41	9	41	7	146	14,63	213,89
39	21	31	9	41	15	156	24,63	606,39
40	28	14	18	33	26	159	27,63	763,14
41	21	22	29	23	15	151	19,63	385,14
42	1	4	1	3	45	96	-35,38	1251,39
43	1	1	2	1	47	95	-36,38	1323,14
44	35	22	18	33	36	188	56,63	3206,39
45	47	22	40	33	40	227	95,63	9144,14
46	35	14	18	41	15	169	37,63	1415,64
47	21	31	18	33	26	176	44,63	1991,39
48	10	31	9	23	15	136	4,63	21,39
Сумма	1022	1029	1027	1031	1021	6306	0	69807,25

Расположим факторов по значимости согласно суммарному рангу каждого параметра.

Результат приведен в таблице 6.

Таблица 6 - Расположение факторов по значимости (составлено автором)

Название параметра	№	Сумма рангов
Ограничения пропускной способности	32	62
Многопутевое распространение	33	63
Затухание сигнала	31	69
Пропускная способность акустического канала	34	72
Вероятность ошибки в цифровой связи	35	73
Время отклика	24	89
Биологическое воздействие воды	8	90
Экологическая безопасность	43	95

Продолжение таблицы 6

Запасы лития	42	96
Соленость воды	3	101
Точность и повторяемость	21	101
Чувствительность	22	102
Коэффициенты тангажа и рысканья	15	103
Диапазон и разрешение	23	103
Усталость	27	108
Коэффициенты добавочной массы	14	112
Химическое воздействие воды	7	114
Потребляемая мощность	20	116
Сопротивление воды	9	117
Коэффициент подъемной силы	13	120
Стойкость к вибрациям	30	120
Стойкость к смятию	28	123
Температура воды	4	125
Разнообразие	37	127
Прочность	26	131
Плотность воды	2	133
Робастность	25	133
Подводные течения	1	134
Коммуникационные сигналы	48	136
Стойкость к высокому давлению	29	145
Обнаружение и изоляция неисправностей	38	146
Емкость аккумулятора	19	149
Состояние технологии производства	41	151
Ударные нагрузки	6	155
Коэффициент сопротивления	12	155
Восстановление после сбоев	39	156
Инжиниринг надежности	40	159
Инерция	11	162
Ориентация в пространстве	46	169
Избыточность	36	172

Продолжение таблицы 6

Гидростатические нагрузки	5	175
Состояние системы	47	176
Масса	10	180
Эффективность движителя	17	183
Вектор движения	44	188
Маневренность	18	190
Тяга	16	200
Глубина погружения	45	227

Средняя степень согласованности мнений всех экспертов оценивается с помощью коэффициента конкордации, в том случае, когда имеются связанные ранги (одинаковые значения рангов в оценках одного эксперта).

Коэффициент конкордации (59):

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^n R_j^2 - 3m^2n(n+1)^2}{m^2n(n^2 - 1)} = 0,772723 \quad (59)$$

где W – коэффициент конкордации Кендалла, показывающий согласованность мнений экспертов,

m – число экспертов,

n – число ранжируемых объектов.

При $W > 0,5$ существует согласованность мнений экспертов.

Далее проводим оценку значимости коэффициента конкордации, для этого вычисляется критерий согласованности Пирсона (60):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (60)$$

где χ^2 – значение критерия согласованности Пирсона,

k – число категорий,

O_i – фактическое наблюдаемое значение,

E_i – ожидаемое (теоретически рассчитанное) значение для i -й категории при нулевой гипотезе.

Для оценки значимости коэффициента конкордации W с использованием критерия согласованности Пирсона (χ^2 критерий), мы можем использовать следующую формулу (61):

$$\chi^2 = W \cdot m \cdot (n - 1) \quad (61)$$

Заданные значения:

$$W = 0.772723;$$

$$m = 5;$$

$$n = 48.$$

Подставляем значения в формулу (62):

$$\chi^2 = 0.772723 \cdot 5 \cdot (48 - 1)$$

$$\chi^2 \approx 181.489905 \quad (62)$$

Теперь у нас есть значение χ^2 , которое мы можем сравнить с критическим значением из таблицы распределения χ^2 для определения статистической значимости.

Степени свободы (63):

$$df = n - 1 = 47 \quad (63)$$

Используя таблицу χ^2 для 47 степеней свободы, мы можем оценить значимость на уровне значимости 0.05 или 0.01, чтобы увидеть, превышает ли наше расчётное значение критические значения для этих уровней. Обычно для 47 степеней свободы и уровня значимости 0.05, критическое значение будет около 63.167, что значительно меньше нашего значения, указывая на статистическую значимость коэффициента конкордации.

Согласно таблице 6 «Расположение факторов по значимости», рассчитывается вес (λ) каждого параметра исходя из суммы рангов (R) всех экспертов. Для этого сумму сумм рангов примем за единицу и, согласно формуле (64):

$$\lambda_i = \frac{R_i}{\sum_{i=48}^n R_i} \quad (64)$$

Далее рассчитан вес первого параметра (65), для остальных проведены аналогичные вычисления (Таблица 7):

$$\lambda_i = \frac{134}{6306} = 0.0212 \quad (65)$$

Таблица 7 - Расчет весов параметров (составлено автором)

Наименование Параметра	№	Сумма рангов	Вес
Ограничения пропускной способности	32	62	0,0098
Многопутевое распространение	33	63	0,0100
Затухание сигнала	31	69	0,0109
Пропускная способность акустического канала	34	72	0,0114
Вероятность ошибки в цифровой связи	35	73	0,0116

Продолжение таблицы 7

Время отклика	24	89	0,0141
Вероятность ошибки в цифровой связи	35	73	0,0116
Время отклика	24	89	0,0141
Биологическое воздействие воды	8	90	0,0143
Экологическая безопасность	43	95	0,0151
Запасы лития	42	96	0,0152
Соленость воды	3	101	0,0160
Точность и повторяемость	21	101	0,0160
Чувствительность	22	102	0,0162
Коэффициенты тангажа и рысканья	15	103	0,0163
Диапазон и разрешение	23	103	0,0163
Усталость	27	108	0,0171
Коэффициенты добавочной массы	14	112	0,0178
Химическое воздействие воды	7	114	0,0181
Потребляемая мощность	20	116	0,0184
Сопротивление воды	9	117	0,0186
Коэффициент подъемной силы	13	120	0,0190
Стойкость к вибрациям	30	120	0,0190
Стойкость к смятию	28	123	0,0195
Температура воды	4	125	0,0198
Разнообразие	37	127	0,0201
Прочность	26	131	0,0208
Плотность воды	2	133	0,0211
Робастность	25	133	0,0211
Подводные течения	1	134	0,0212
Коммуникационные сигналы	48	136	0,0216
Стойкость к высокому давлению	29	145	0,0230
Обнаружение и изоляция неисправностей	38	146	0,0232
Емкость аккумулятора	19	149	0,0236
Состояние технологии производства	41	151	0,0239
Ударные нагрузки	6	155	0,0246

Продолжение таблицы 7

Коэффициент сопротивления	12	155	0,0246
Восстановление после сбоев	39	156	0,0247
Инжиниринг надежности	40	159	0,0252
Инерция	11	162	0,0257
Ориентация в пространстве	46	169	0,0268
Избыточность	36	172	0,0273
Гидростатические нагрузки	5	175	0,0278
Состояние системы	47	176	0,0279
Масса	10	180	0,0285
Эффективность двигателя	17	183	0,0290
Вектор движения	44	188	0,0298
Маневренность	18	190	0,0301
Тяга	16	200	0,0317
Глубина погружения	45	227	0,0360

Согласно представленной выше таблице 7 «Расчет весов параметров», было принято решение взять в рассмотрение и считать значимыми только те параметры, которые, исходя из диаграммы Парето (Рисунок 15), имеют вес $\lambda \geq 0,0216$. Выбранные параметры представлены в таблице 8. На диаграмме Парето по оси ординат отложены веса параметров, как в численном, так и в накопленном процентом выражении, а по оси абсцисс – сами параметры технологического процесса, расположенные в порядке убывания. Первые столбцы диаграммы демонстрируют наиболее важные параметры процесса, все другие, находящиеся за отделяющей кумулятивной кривой, параметры остаются без изменений, поскольку их способность повлиять на итоги мала. Принимая во внимание важные факторы, появляется возможность сфокусировать внимание на устранении наиболее значимых проблем.

2.4 Построение концептуальной модели АНПА

Каждый проект системы или разработка программного обеспечения начинается с создания концептуальной модели объекта. Эта модель объединяет концепции, описывающие изучаемую область. Основным элементом в её разработке является анализ научных работ, предоставляющих чёткое понимание структуры объекта и его взаимосвязанных компонентов. Графическое изображение концептуальной модели обычно предпочтительнее текстового описания, так как диаграммы и схемы наглядно показывают основные связи между элементами.

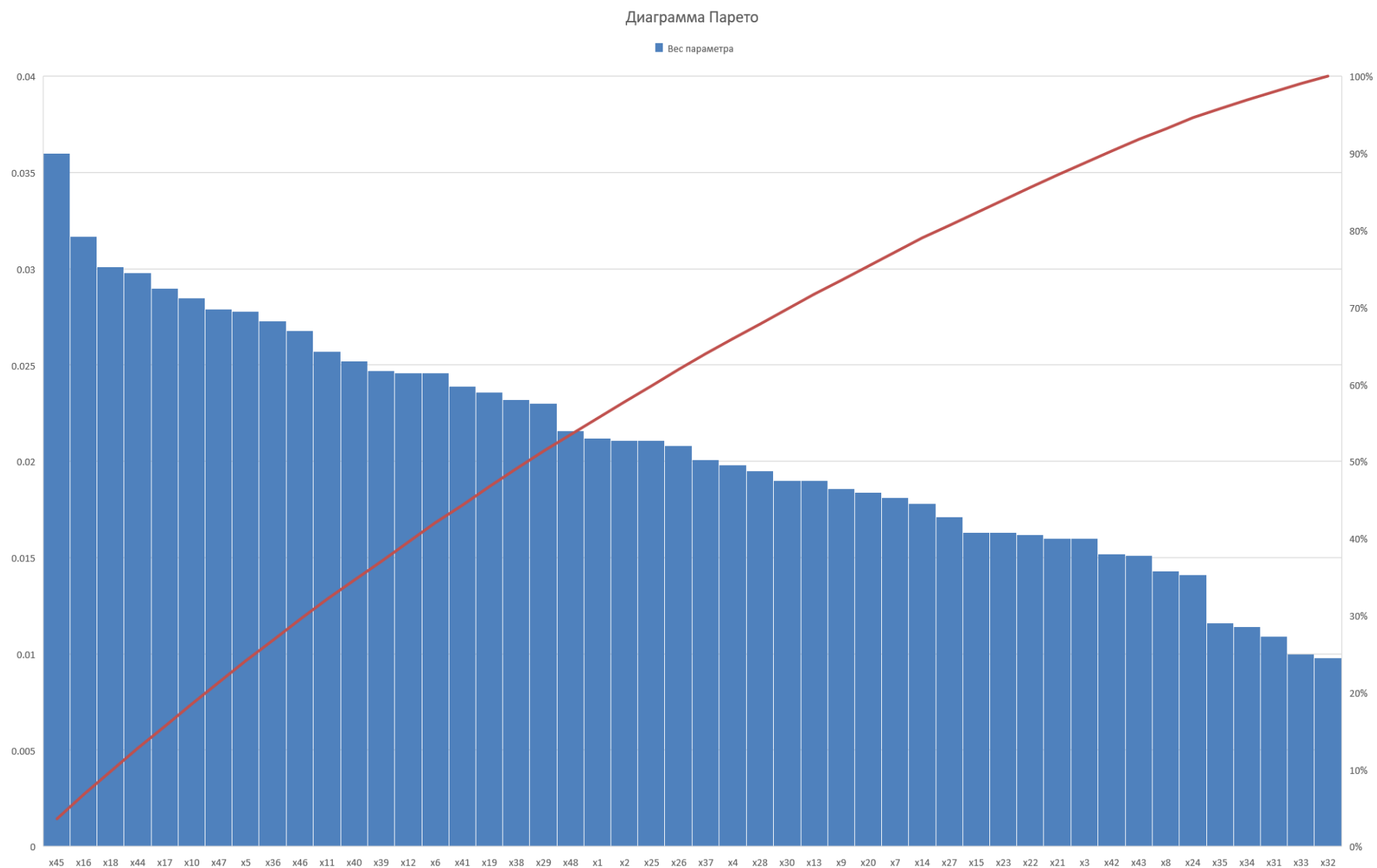


Рисунок 15 – Диаграмма Парето (составлено автором)

Таблица 8 - Параметры, выбранные в качестве наиболее значимых для АНПА (составлено автором)

Коммуникационные сигналы	48	136	0,0216
Стойкость к высокому давлению	29	145	0,0230
Обнаружение и изоляция неисправностей	38	146	0,0232
Емкость аккумулятора	19	149	0,0236
Состояние технологии производства	41	151	0,0239
Ударные нагрузки	6	155	0,0246
Коэффициент сопротивления	12	155	0,0246
Восстановление после сбоев	39	156	0,0247
Инжиниринг надежности	40	159	0,0252
Инерция	11	162	0,0257
Ориентация в пространстве	46	169	0,0268
Избыточность	36	172	0,0273
Гидростатические нагрузки	5	175	0,0278
Состояние системы	47	176	0,0279
Масса	10	180	0,0285
Эффективность движителя	17	183	0,0290
Вектор движения	44	188	0,0298
Маневренность	18	190	0,0301
Тяга	16	200	0,0317
Глубина погружения	45	227	0,0360

Разработка концептуальной модели основана на данных, собранных в ходе экспертных оценок и определения ключевых параметров. Основой для модели служит таблица 8. В качестве центрального объекта модели выбран автономный необитаемый подводный аппарат, с акцентом на наиболее значимые входные и выходные параметры, указанные в таблице. Построенная модель, демонстрирующая эти технологические параметры, представлена на диаграмме (Рисунок 16).

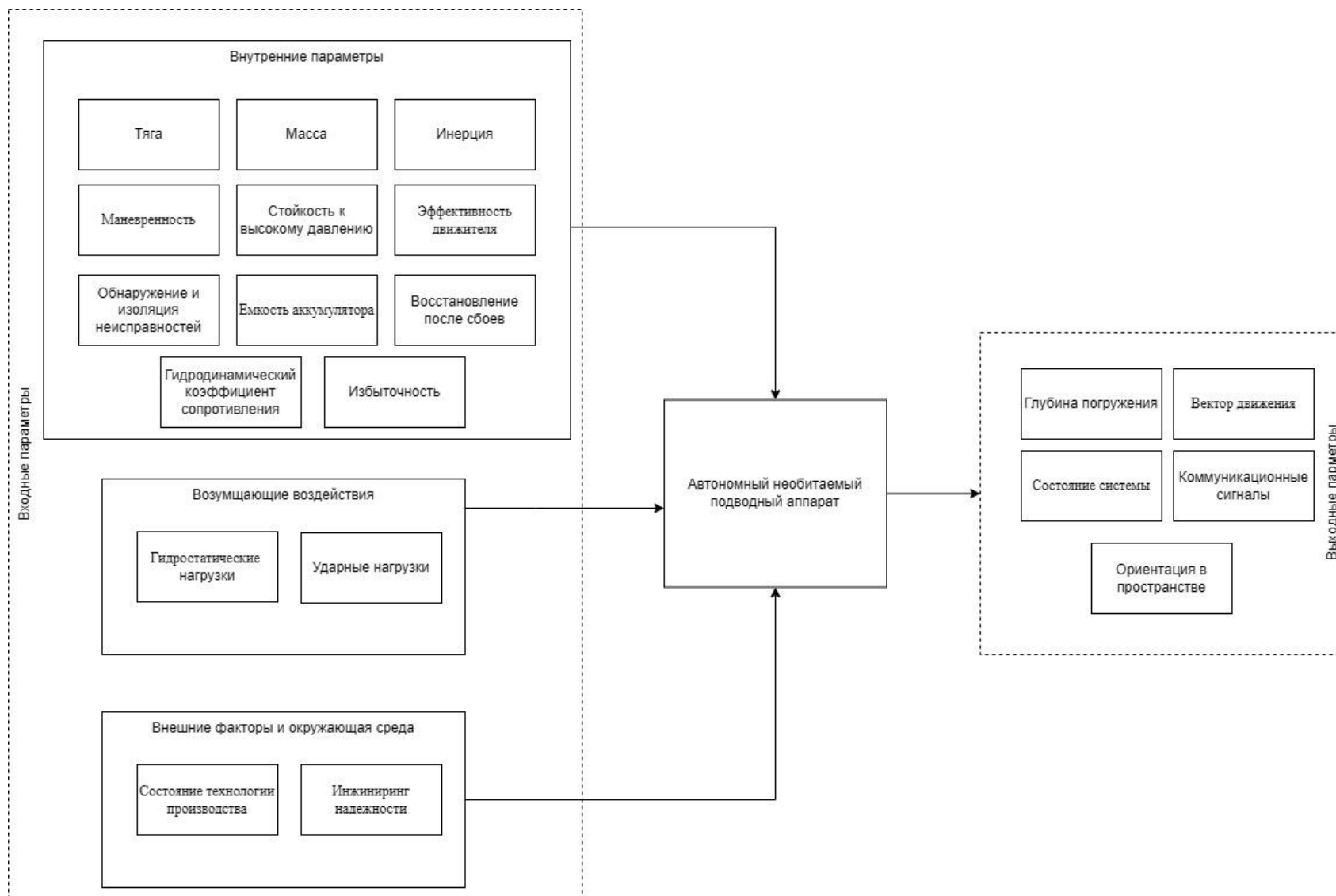


Рисунок 16 – Модель ИУС АНПА (составлено автором)

Концепции, включённые в модель, детализируются и интерпретируются, чтобы модель могла служить основой для последующего разработки методов сбора данных и др. Некоторые термины применяются в математическом контексте, что позволяет описать их через уравнения и формулы.

Слева на диаграмме выделены три группы входных воздействий:

- 1) внутренние конструктивно-технологические параметры, определяющие динамические характеристики, энергетический баланс и показатели живучести аппарата;
- 2) внешние возмущения (гидростатические и ударные нагрузки), формирующие стохастическое силовое поле;
- 3) производственные факторы макроуровня, влияющие на распределения показателей надёжности.

Все указанные группы воздействий поступают на центральный элемент — математическую модель АНПА, представленную нелинейной системой уравнений движения с медленно изменяющимися во времени параметрами. Правая часть диаграммы описывает выходной вектор наблюдаемых параметров (глубина, траектория движения, ориентация, состояния систем и коммуникационные сигналы), который используется для оперативного управления миссией, а также формирует обратные связи, поступающие на уровни проектирования и производства. Таким образом, предложенная концептуальная схема объединяет динамические характеристики, показатели надёжности и производственные аспекты АНПА и представляет методическую основу для его комплексного анализа и оптимизации на протяжении всего жизненного цикла.

2.5 Математическая модель пространственного движения АНПА

Систематизируя вышеприведенные уравнения описывающие составляющие АНПА и выделенные из этих составляющих наиболее важные элементы, получим математическую модель объекта (66).

Математическая модель для автономного необитаемого подводного аппарата представляет собой систему уравнений, позволяющую оценивать и определять параметры работы аппарата, влияющие на его основные характеристики. Эта модель также устанавливает внутренние и внешние связи между различными системами и компонентами аппарата. Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов оптимального управления АНПА.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \rho_w \cdot V \cdot g = m \cdot g \\
 I = \sum m_i \cdot r_i^2 \\
 I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \\
 I \cdot \dot{\omega} + \omega \times (I \cdot \omega) = \tau \\
 F_{thrust} = \dot{m} v_{exhaust} \\
 \begin{cases} R = (v^2)/(g * \tan(\phi)) \\ \dot{\theta} = \frac{M_{angle}}{I_{yy}} \end{cases} \\
 \sigma_h = \frac{p_d D}{2t} \\
 \eta = (T * v)/P \\
 \begin{cases} y = Cx + Du + v \\ \hat{x} = Ax + Bu + L(y - \hat{y}) \end{cases} \\
 E = C \times V \\
 x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Kf(t) \\
 F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A \\
 R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \\
 P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \\
 \sigma = \frac{F}{A} \\
 T(S) = \omega_1 R(S) + \omega_2 \left(\frac{1}{C(S)} \right) + \omega_3 E(S) \\
 MTBF = \frac{1}{\lambda} \\
 m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \nabla P + \vec{f}_{drag} + \vec{b} \\
 \frac{dD}{dt} = v_z - \frac{(\rho_w V - m)g}{m} \\
 \begin{cases} q = (q_0) \\ \dot{q} = \frac{1}{2} q \otimes \omega \end{cases} \\
 \begin{cases} s(t) = [s_1] \\ \dot{s}(t) = As(t) + Bu(t) \end{cases} \\
 c(t) = \sum_{i=1}^N h_i(t) * x_i(t) + n(t)
 \end{array} \right. \quad (66)$$

Таким образом, модель ИУС АНПА учитывает следующие показатели:

- Коммуникационные сигналы, определяющие возможности и качество связи под водой.
- Стойкость к высокому давлению и гидростатические нагрузки, критичные для подводных условий.

- Обнаружение и изоляция неисправностей, гарантирующие стабильную работу при возникновении проблем.
 - Емкость аккумулятора и эффективность двигателя, важные для автономности и продолжительности миссии.
 - Состояние технологии производства, влияющее на качество и надежность всех компонентов.
 - Ударные нагрузки и инжиниринг надежности, обеспечивающие долговечность аппарата.
 - Коэффициент сопротивления и вектор движения, важные для гидродинамических характеристик.
 - Восстановление после сбоев, критическое для сохранения функциональности.
 - Инерция и ориентация в пространстве, определяющие маневренность и точность позиционирования.
 - Избыточность систем, улучшающая общую надежность.
 - Масса и тяга, влияющие на энергетическую эффективность и глубину погружения.
- Эти факторы в комплексе определяют работоспособность и эффективность ИУС АНПА в заданных условиях эксплуатации.

2.6 Выводы по главе 2

В главе разработана детализированная концептуальная модель функционирования информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата, отражающая основные структурные элементы, входные и выходные параметры, а также внутренние и внешние факторы, влияющие на работу аппарата. Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в рецензируемой научной статье [60].

Проведённый анализ позволил выявить ключевые возмущающие воздействия, включая гидростатические нагрузки, подводные течения, изменения свойств морской воды, биологические и химические воздействия, которые существенно влияют на эксплуатационные характеристики АНПА.

На основе детального рассмотрения внутренних параметров системы установлена их важная роль в обеспечении устойчивости, маневренности, энергоэффективности и отказоустойчивости АНПА. Особое внимание уделено таким параметрам, как масса, инерция, гидродинамические характеристики, характеристики двигателей, ёмкость аккумулятора и конструктивные свойства.

В рамках подготовки этапа экспертной оценки был осуществлён отбор экспертов, обладающих профессиональным опытом в области подводной робототехники. Эксперты оценивали важность 48 параметров по шкале от 1 до 10.

На основании экспертных оценок был проведён расчёт коэффициента конкордации ($W = 0,7727$), что свидетельствует о высокой степени согласованности мнений экспертов и обоснованности итоговых выводов о значимости отдельных параметров.

В результате корреляционного анализа определены наиболее важные параметры, существенно влияющие на работоспособность и эффективность информационно-управляющей системы АНПА, включая коммуникационные сигналы, устойчивость к давлению, ёмкость аккумулятора, инерцию, массу и параметры управления движением и ориентацией аппарата.

Построенная итоговая концептуальная модель ИУС АНПА представляет собой интегрированную систему, описывающую причинно-следственные связи между значимыми параметрами, и позволяет разрабатывать алгоритмы управления и прогнозировать поведение аппарата в различных эксплуатационных условиях.

Таким образом, предложенная в данной главе концептуальная модель обеспечивает структурно-параметрическую основу для дальнейшей разработки и оптимизации системы управления АНПА с целью повышения её надёжности и эффективности в подводных условиях.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МИНЕРАЛЬНО- СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

3.1 Обоснование функциональных требований к информационно-управляющей системе АНПА

Информационно-управляющая система автономного необитаемого подводного аппарата должна обеспечивать комплексные исследования морского дна в интересах минерально-сырьевого комплекса. Цель миссий заключается в проведении геологоразведки, мониторинге подводных сооружений, определении потенциальных залежей полезных ископаемых, а также сборе данных о рельефе, донных отложениях и составе пород на глубинах до 3000 метров.

Функциональные задачи ИУС АНПА обозначены на схеме, представленной на рисунке 17.

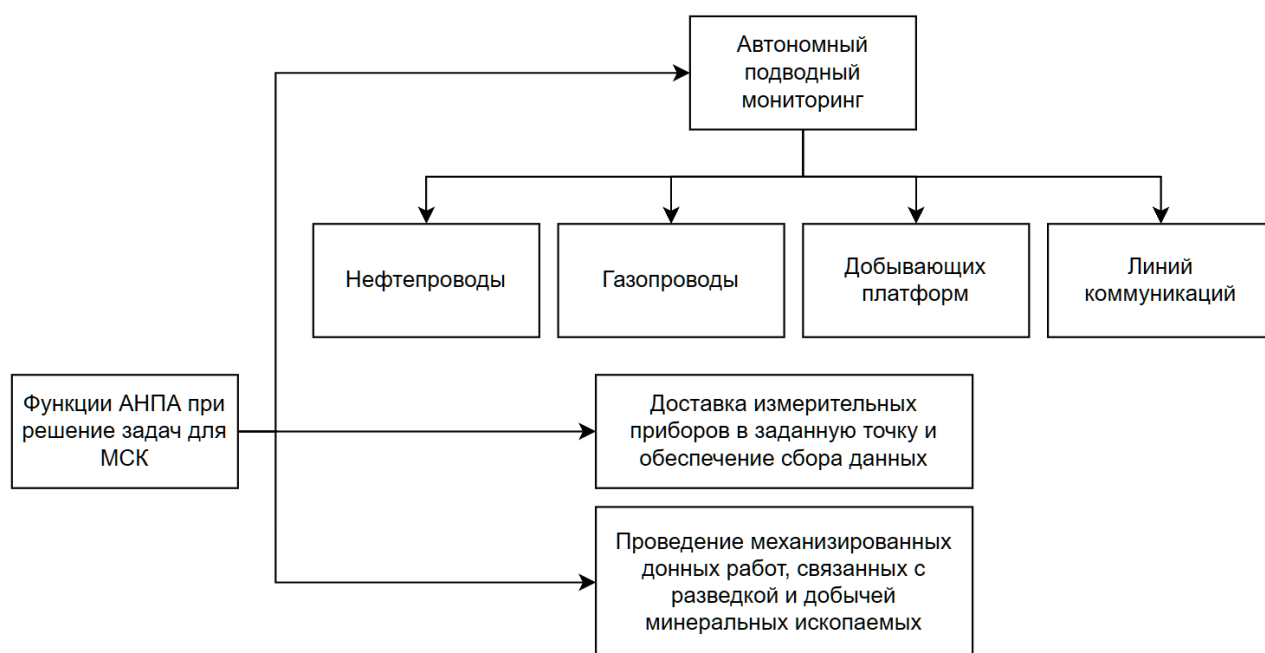


Рисунок 17 – Функции АНПА при решении задач МСК (составлено автором)

Для удовлетворения этих потребностей выделим несколько ключевых требований к информационно-управляющей системе (Таблица 9)

Таблица 9 - Сводная таблица требований к ИУС АНПА (составлено автором)

№	Показатель	Требования к показателю	Обоснование (пояснение)
1	Точность удержания курса	$\pm 0,3^\circ$	Обеспечивает точность картографирования и исключает пропуски объектов на основе технических возможностей современных ИНС и DVL.
2	Точность удержания глубины	$\pm 0,2$ м	Позволяет детально исследовать рельеф и минимизировать искажения при сканировании дна на глубинах до 3000 м.
3	Скорость обработки информационного потока	2–3 МБ/с	Совокупный поток данных от гидролокаторов, эхолотов, камер и геохимических датчиков при реальном времени анализа.
4	Время автономной работы	48–72 часа	Продолжительность миссий, достаточная для обследования обширных территорий при стандартной энергоёмкости 20–30 кВт·ч батарей.
5	Энергопотребление в активном режиме	300–400 Вт	Средняя мощность работы аппаратуры и систем АНПА при одновременном включении всех сенсоров и вычислительных модулей.
6	Гибкость алгоритмов маршрутизации	Динамическая перестройка траектории до 15% маршрута	Возможность оперативной корректировки миссии для дополнительного обследования выявленных перспективных участков.
7	Дальность акустической связи с буями	до 2–3 км	Обеспечение достаточной дальности и стабильности акустического канала для оперативной телеметрии и передачи команд.
8	Пропускная способность акустического канала	1–2 кбит/с	Минимальная скорость, необходимая для обмена телеметрией и аварийными сигналами между АНПА и буями-ретрансляторами.
9	Скорость радиоканала при всплытии	1-2 МБ/с	Передача крупных массивов геологоразведочных данных оператору на судно или в береговой центр управления при всплытии.

Продолжение таблицы 9

10	Точность позиционирования по системе LBL/USBL	до 1–2 м	Гарантированная точность координатной привязки, обеспечиваемая работой системы навигационных подводных маяков.
11	Совместимость и кооперация нескольких аппаратов	Поддержка протоколов обмена координатами и статусом	Позволяет нескольким АНПА одновременно обследовать район, исключая пересечение маршрутов и помехи гидролокаторов.
12	Защита информации	Криптографическая защита данных и команд	Предотвращение несанкционированного доступа к геологоразведочной информации и управления аппаратом.

Во-первых, важно обеспечить высокую точность навигации, поддерживая погрешность по курсу в пределах $\pm 0,3^\circ$ и по глубине около $\pm 0,2$ м. Подобная точность диктуется необходимостью корректного совмещения траектории движения аппарата с картографическими материалами и результатами геологоразведки. Современные высокоточные инерциальные системы (например, на базе MEMS-датчиков) и доплеровские лаги в сочетании с периодической коррекцией координат (через подводные маяки или при всплытии на спутниковые сигналы) способны достигать погрешностей порядка $0,1^\circ$ по курсу и менее 0,2 м по глубине. В условиях переменных течений и изменений плавучести, целевыми становятся значения $\pm 0,3^\circ$ и $\pm 0,2$ м, позволяющие избежать пропусков участков дна и максимально точно проводить геологоразведку.

Во-вторых, при геологоразведочных миссиях АНПА формирует большой объём данных, что обуславливает требование к пропускной способности информационных каналов и вычислительным ресурсам системы. Объём входящих потоков от боковых гидролокаторов, трёхмерных эхолотов, камер и геохимических сенсоров может достигать 2–3 МБ/с, учитывая высокую частоту сканирования (5–10 Гц) и высокое пространственное разрешение (5–10 см). Для их параллельной обработки и первичной интерпретации необходима высокопроизводительная бортовая архитектура, включающая GPU-ускорители или DSP-процессоры и скоростные шины (Gigabit Ethernet, PCIe). Опыт эксплуатации подобных гидролокационных и эхолотационных систем демонстрирует, что такая организация данных действительно необходима для своевременного выявления аномалий рельефа и оценки состава донных отложений.

Третьим критерием выступает длительная автономность в диапазоне 48–72 часов, которая обеспечивается сбалансированным режимом энергопотребления (300–400 Вт при

активной работе датчиков и вычислителей) и емкостью источников питания (20–30 кВт·ч для литий-ионных батарей). Подобная автономность допускает полномасштабное исследование обширных площадей дна в условиях минимальных сеансов связи, что особенно важно при работе на отдалённых участках шельфа и склона, где обеспечивается лишь эпизодическое взаимодействие с оператором. В режиме «гибридного» управления аппарат отключает неиспользуемые сенсоры, замедляет частоту обработки и снижает нагрузку на энергетическую систему при отсутствии потребности в интенсивной деятельности.

Четвёртой важной компонентой является гибкость алгоритмов планирования маршрутов и сценариев работы. В ходе сканирования могут неожиданно обнаруживаться минералогические аномалии или области сложного рельефа, требующие детального изучения. Жёстко фиксированный план не позволяет оперативно переключаться на локальный обход, вследствие чего аппарат потенциально теряет часть ценной информации или сталкивается с рисками, связанными со сложными формами дна. Современные методики управления включают динамическую перестройку траектории, используя методы локального поиска, благодаря чему АНПА в реальном времени реагирует на вновь поступившие сигналы и адаптирует свою миссию к текущей геологической обстановке.

Немаловажным остаётся надёжное взаимодействие с внешними системами - оператором на судне-носителе, буями-ретрансляторами, береговым центром. В период подводного нахождения аппарат поддерживает связь через акустические модемы в диапазоне 18–34 кГц, что обеспечивает скорость 1–2 кбит/с на расстоянии до 2–3 км при удовлетворительном качестве канала. Это хватает для передачи телеметрии, аварийных уведомлений и приёма базовых управляющих команд. При всплытии аппарат переходит на радиоканал, поддерживая обмен существенно большими объёмами (десятки МБ в считанные минуты). Подобная схема обеспечивает непрерывный мониторинг хода миссии и возможность раздачи обновлённых сценариев, если береговой центр или судно получили новые сведения о перспективах залегания ископаемых.

Завершающее требование касается безопасной интеграции с навигационными системами (LBL/USBL) и потенциально с другими АНПА. Большие зоны шельфа всё чаще обследуются комплексно: несколько АНПА, каждая со своим набором датчиков, обмениваются информацией об уже исследованных секторах, избегают дублирования маршрутов и оптимизируют использование акустического канала во избежание взаимных помех. Для этого информационно-управляющая система должна корректно взаимодействовать с локальными стационарными маяками, обеспечивать криптографическую защиту команд и передаваемых данных, а также иметь протоколы согласования параметров курса и глубины, чтобы аппараты координировались, не мешая друг другу при поиске и картировании морских минералов. Такой подход снижает

совокупное время исследований и повышает качество получаемой информации, что чрезвычайно важно в коммерческой и научной деятельности минерально-сырьевого комплекса.

3.2 Построение иерархической структуры свойств информационно-управляющей системы АНПА

Тип задачи, выполняемой автономным подводным аппаратом, напрямую влияет на построение информационно-управляющей системы. Под каждую задачу следует рассмотреть различные возможные варианты структуры построения. Общая схема приведена на рисунке 18.

Несмотря на различия, можно выделить 4 основных уровня:

1. Уровень системы
2. Уровень датчиков и оборудования
3. Уровень обработки данных
4. Уровень безопасности и надежности

Для наглядного сравнения иерархических структур свойств информационно-управляющей системы АНПА разработанных для выполнения различных подводных задач, была сформирована сводная таблица 10, которая покажет основные сходства и различия между требованиями для каждой задачи. Это поможет понять, какие аспекты системы могут быть унифицированы, а какие требуют специализации.

3.3 Структурно-параметрический синтез рациональных вариантов информационно-управляющей системы АНПА

В рамках структурно-параметрического синтеза информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата были выделены три рациональных варианта архитектуры. Каждый последующий вариант является логическим развитием предыдущего, расширяя вычислительные возможности системы и улучшая её взаимодействие с внешними инфраструктурными объектами — судном-носителем, акустическими буями-ретрансляторами, навигационными маяками, береговым центром управления, а также другими АНПА. Представленная далее последовательность улучшений (варианты $A \rightarrow B \rightarrow C$) показывает постепенное устранение выявленных ограничений и достижение оптимального сочетания характеристик.

3.4 Структурно-параметрический синтез рациональных вариантов информационно-управляющей системы АНПА

В рамках структурно-параметрического синтеза информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата были выделены три рациональных варианта архитектуры. Каждый последующий вариант является логическим развитием предыдущего, расширяя вычислительные возможности системы и улучшая её взаимодействие с внешними

инфраструктурными объектами — судном-носителем, акустическими буями-ретрансляторами, навигационными маяками, береговым центром управления, а также другими АНПА.

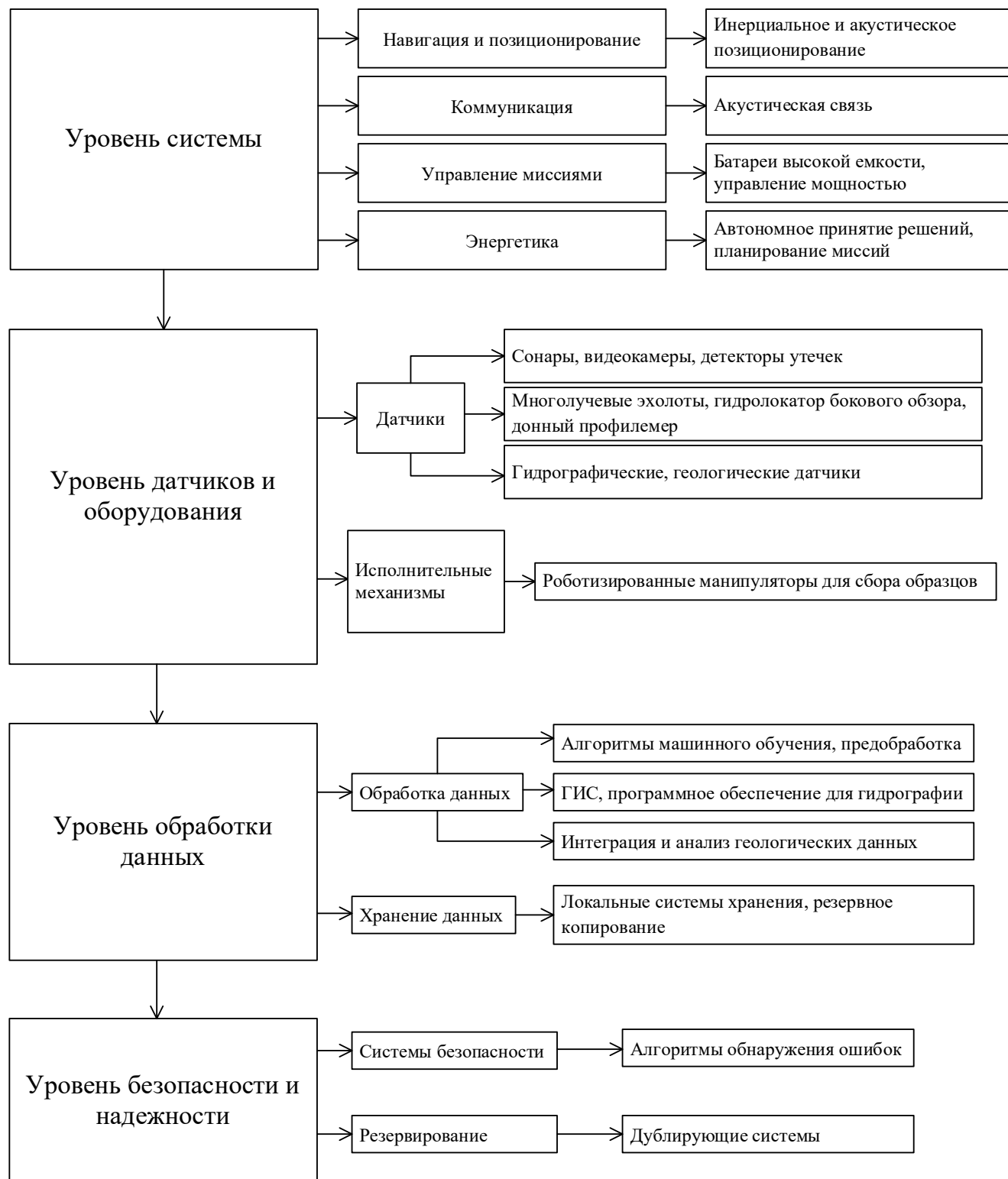


Рисунок 18 – Иерархическая структура свойств ИУС АНПА (составлено автором)

Таблица 10 - Сводная таблица свойств ИУС АНПА для различных задач (составлено автором)

Основной уровень	Категория	Мониторинг трубопроводов	Картографирование дна	Сбор образцов породы
Уровень системы	Навигация	Инерциальное и акустическое позиционирование		
	Коммуникация	Акустическая связь		
	Энергетика	Батареи высокой емкости, управление мощностью		
	Управление миссиями	Автономное принятие решений, планирование миссий		
Уровень датчиков и оборудования	Датчики	Сонары, видеокамеры,	Многолучевые эхолоты, гидролокатор бокового обзора, донный профилемер	Гидрографические и геологические датчики
	Исполнительные механизмы	Роботизированные манипуляторы (по необходимости)	-	Роботизированные манипуляторы для сбора образцов
Уровень обработки данных	Обработка данных	Алгоритмы машинного обучения, предобработка	ГИС, программное обеспечение для гидрографии	Интеграция и анализ геологических данных
	Хранение данных	Локальные системы хранения, резервное копирование		
Уровень безопасности и надежности	Системы безопасности	Алгоритмы обнаружения ошибок		
	Резервирование	Дублирующие системы		

Представленная далее последовательность улучшений (варианты $A \rightarrow B \rightarrow C$) показывает постепенное устранение выявленных ограничений и достижение оптимального сочетания характеристик.

Вариант А. Централизованная архитектура с базовым взаимодействием с внешней инфраструктурой (Рисунок 19)

Схема потоков данных представлена на рисунке 20.

Первый вариант представляет собой централизованную архитектуру на базе единственного вычислительного модуля с мобильным процессором Intel Core i7-1185GRE (4 ядра, до 4,4 ГГц, энергопотребление до 28 Вт).

Навигационное оснащение включает инерциальную систему SBG Ekinox-E (точность курса $\pm 0,3^\circ$, глубины $\pm 0,2$ м) и доплеровский лаг Nortek DVL500. Сенсорная часть представлена боковым гидролокатором Tritech SeaKing (разрешение до 15 см) и многолучевым эхолотом WASSP WMB-3250.

Связь аппарата с внешней инфраструктурой ограничена только акустическим каналом до судна-носителя (скорость до 1 кбит/с, дальность 2–3 км).

Преимуществами данного варианта являются простота интеграции и низкая стоимость, однако из-за отсутствия резервирования и ограниченных возможностей взаимодействия с внешними системами он недостаточно надёжен для продолжительных автономных миссий.

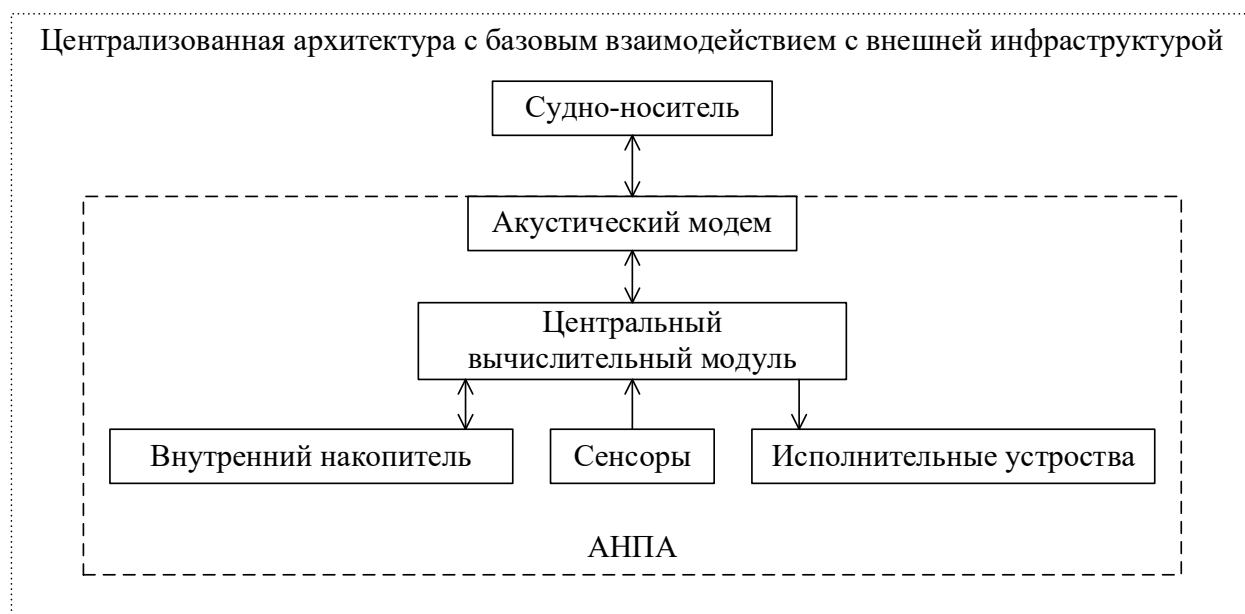


Рисунок 19 - Централизованная архитектура с базовым взаимодействием с внешней инфраструктурой (составлено автором)

Вариант В. Распределённая архитектура с расширенной внешней инфраструктурой (Рисунок 21)

Вариант В устраняет недостатки предыдущего решения, предлагая распределённую архитектуру с несколькими вычислительными модулями на основе ARM-процессоров NXP i.MX8 (Cortex-A72, до 1,8 ГГц) и специализированных цифровых сигнальных процессоров (DSP) Texas Instruments TMS320C6678 (8 ядер, производительность до 160 GFLOPS). Такая конфигурация позволяет эффективно выполнять параллельную обработку геологоразведочных данных. Схема потоков данных показана на рисунке 22.

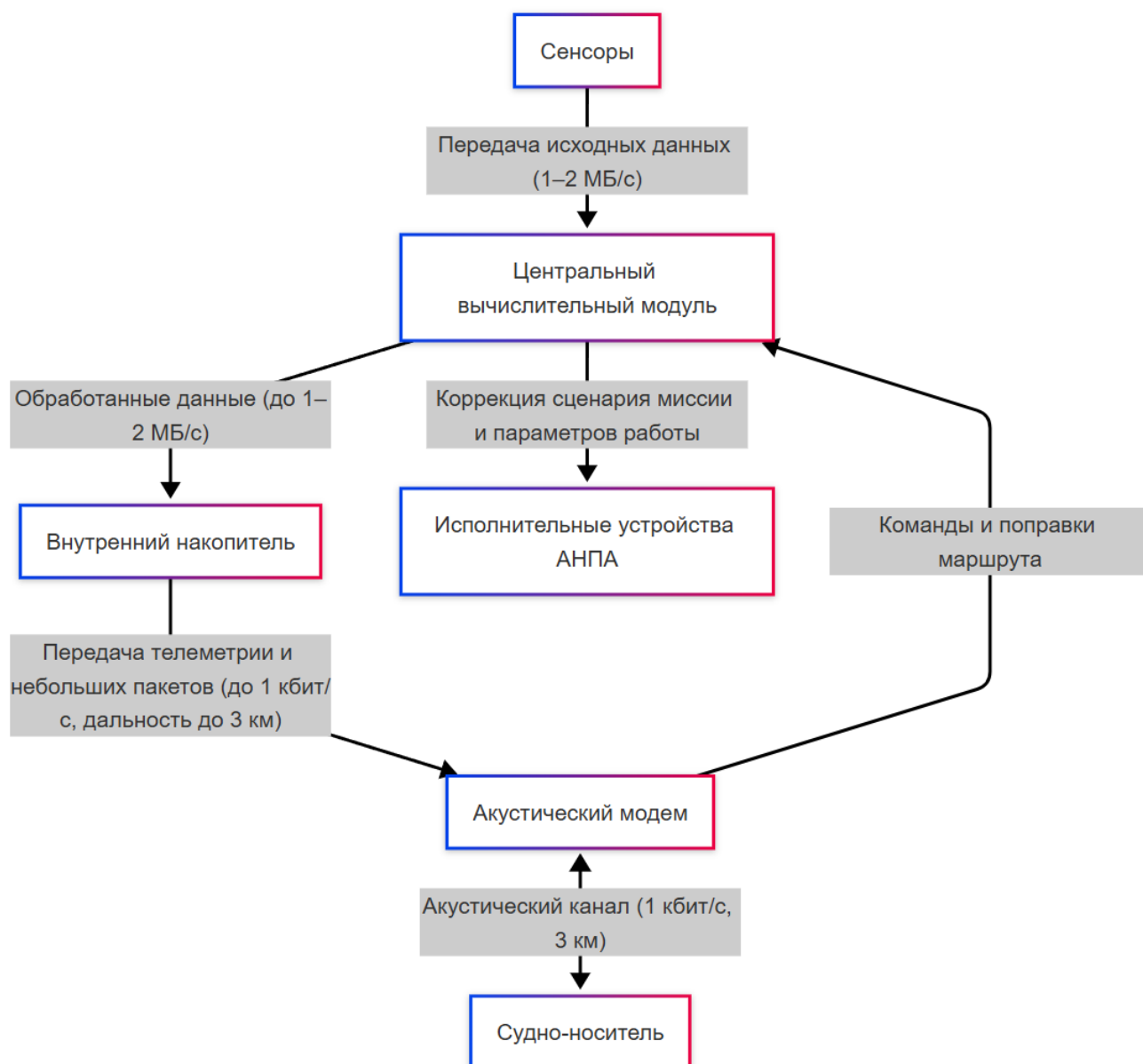


Рисунок 20 – Схема потоков данных. Вариант А. (составлено автором)

Сенсорное оснащение было улучшено: применяется высокочастотный боковой гидролокатор Klein UUV-3500 с разрешением до 5 см, многолучевой эхолот Teledyne Reson SeaBat T20-P и комплекс геохимических датчиков Sea-Bird Scientific. Навигация дополнена USBL-маяком Sonardyne Ranger 2 (точность позиционирования 1–2 м) и более точным доплеровским лагом Teledyne Workhorse Navigator.

Важной особенностью этого варианта является расширенная внешняя инфраструктура: сеть акустических буёв-ретрансляторов EvoLogics S2CR 18/34 (скорость передачи данных 2–3 кбит/с, дальность до 3 км), судно-носитель с улучшенной системой позиционирования и специализированный береговой центр управления для расчёта оптимизированных маршрутов.

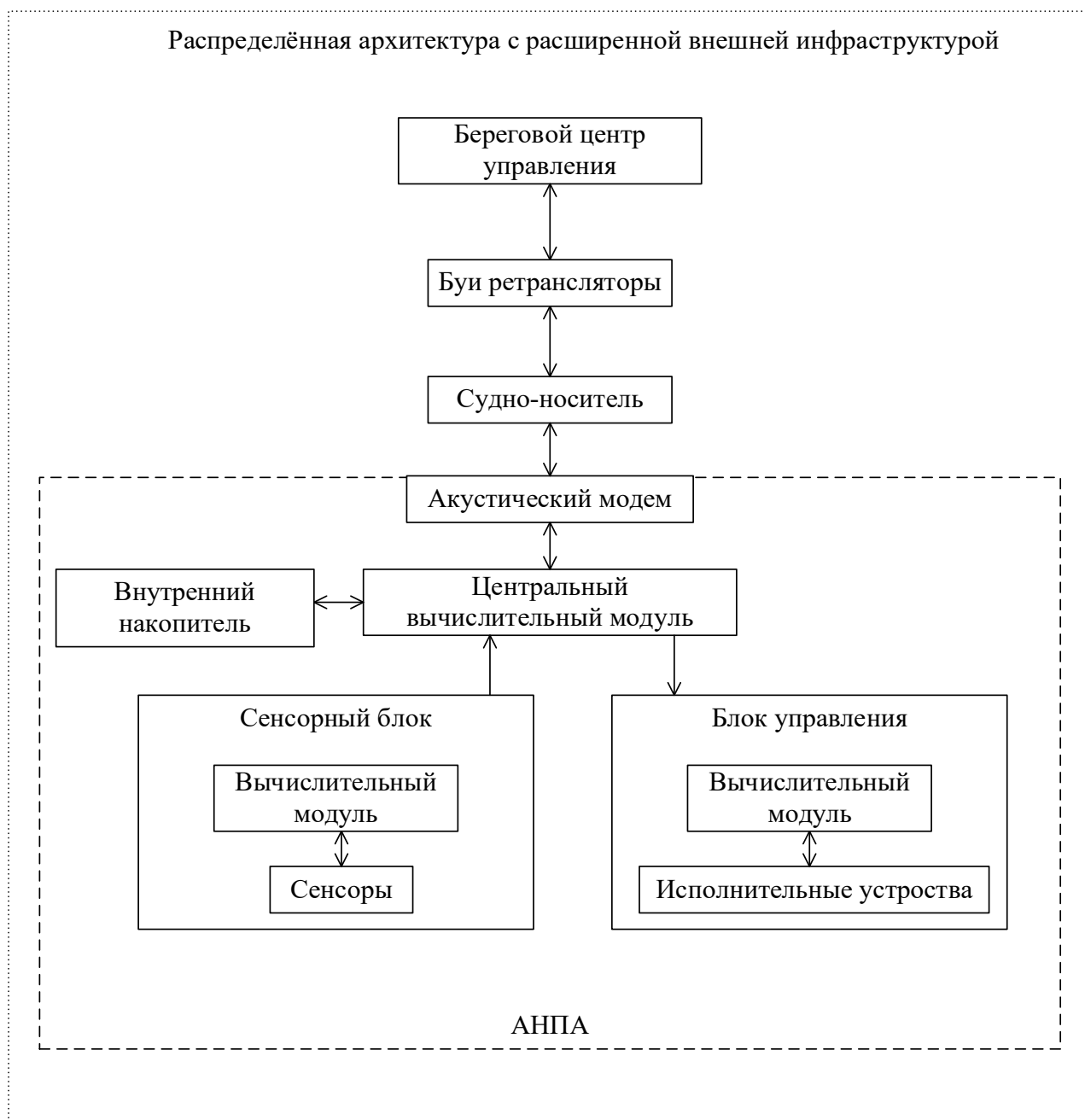


Рисунок 21 - Распределённая архитектура с расширенной внешней инфраструктурой
(составлено автором)

Несмотря на заметно возросшие возможности и повышенную отказоустойчивость, этот вариант характеризуется увеличением технической сложности, энергопотребления (400–500 Вт·ч) и эксплуатационных затрат.

Вариант С. Гибридная архитектура с оптимизированной внешней инфраструктурой (рисунок 23)

Вариант С представляет собой дальнейшее развитие архитектуры с целью устранения недостатков варианта В, прежде всего связанных с высоким энергопотреблением и эксплуатационными затратами.

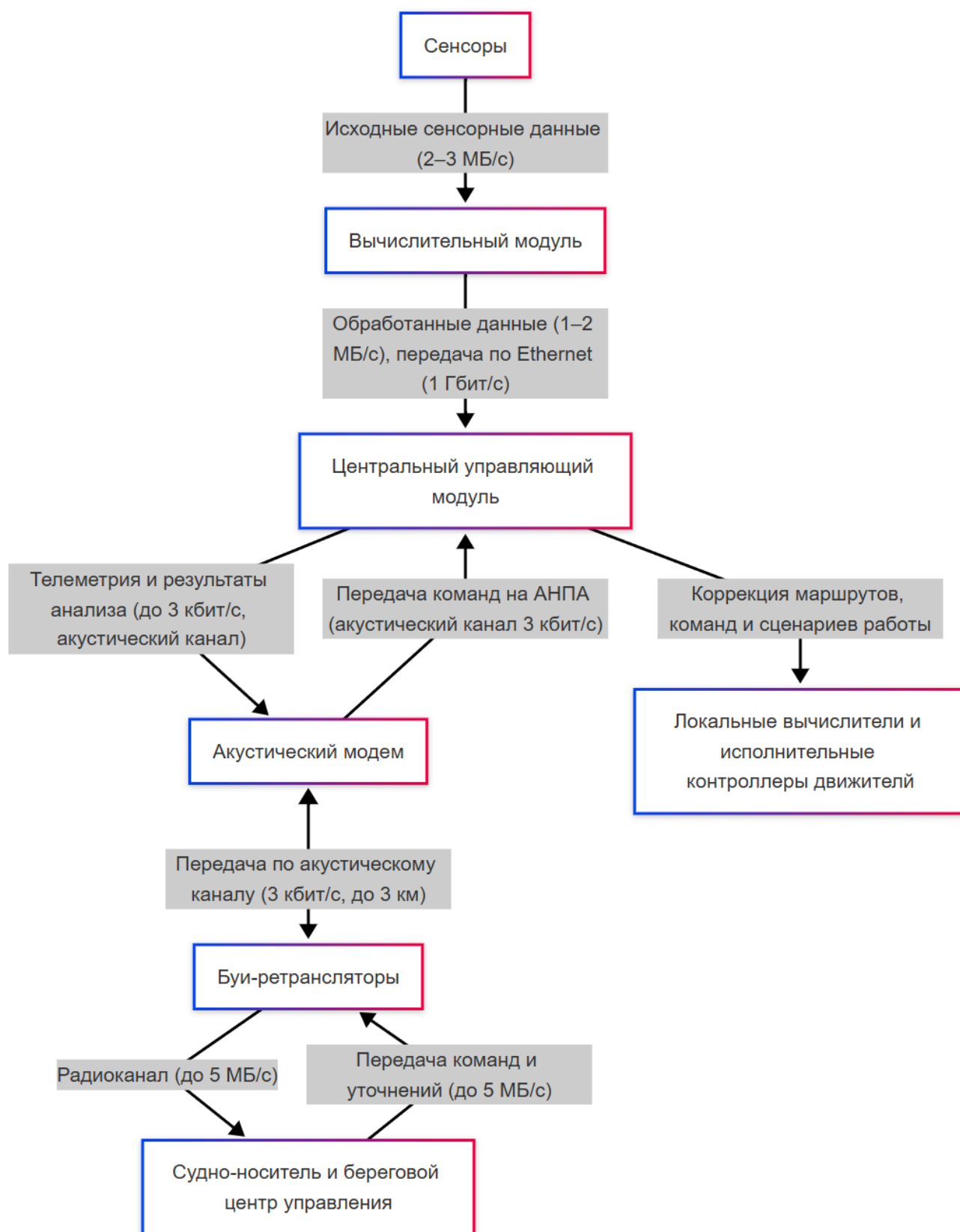


Рисунок 22 – Схема потоков данных. Вариант В. (составлено автором)

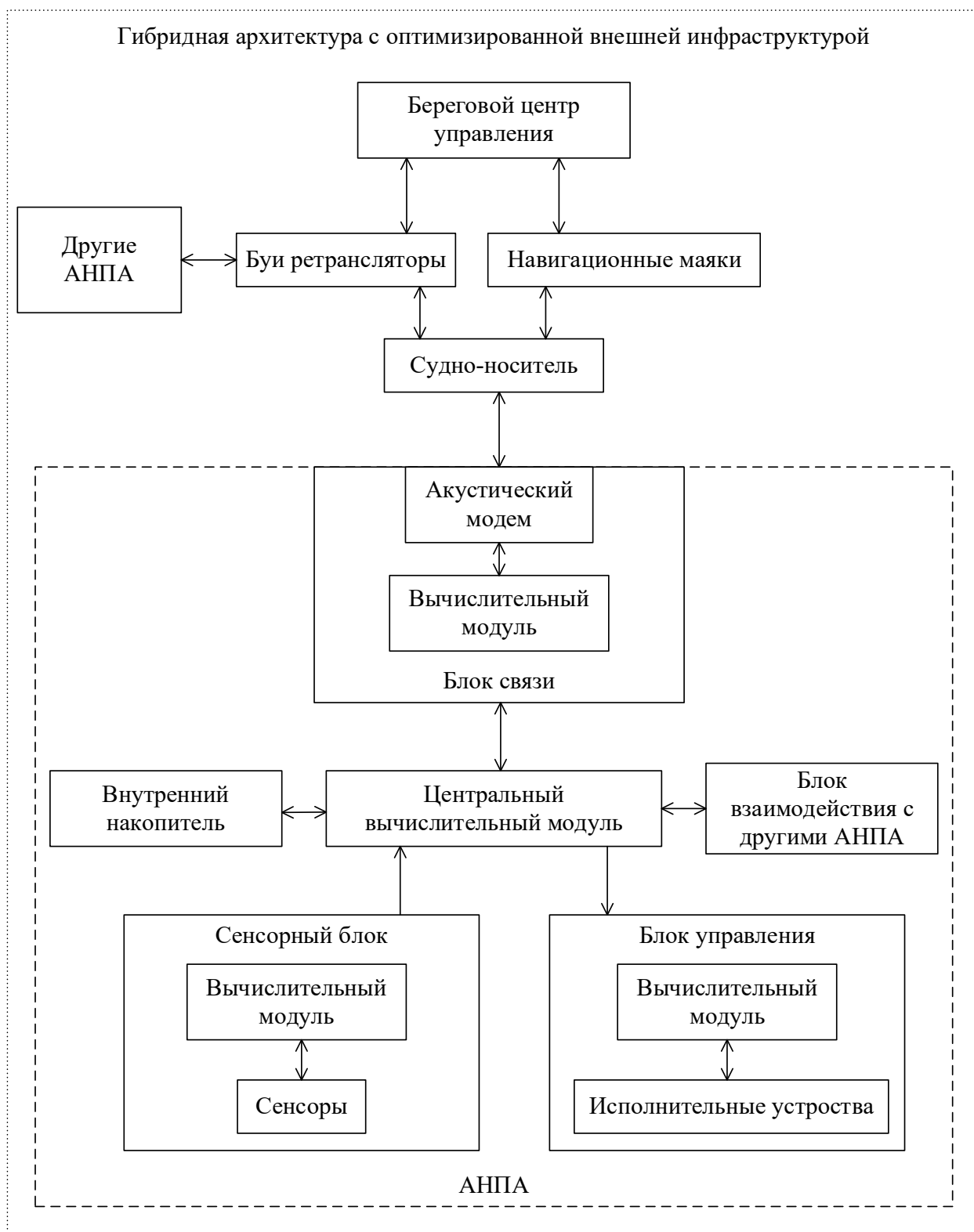


Рисунок 23 - Гибридная архитектура с оптимизированной внешней инфраструктурой
 Схема потоков данных показана на рисунке 24.

В основе гибридной архитектуры лежит высокопроизводительный центральный вычислительный модуль NVIDIA Jetson AGX Orin (ARM Cortex-A78AE, 12 ядер, GPU-ускорение до 275 TOPS, 16 ГБ оперативной памяти), соединённый резервированной Ethernet-шиной с периферийными микроконтроллерами STM32F767. Такая конфигурация обеспечивает

обработку данных в режиме реального времени со скоростью свыше 3 МБ/с при энергопотреблении около 350–400 Вт·ч.

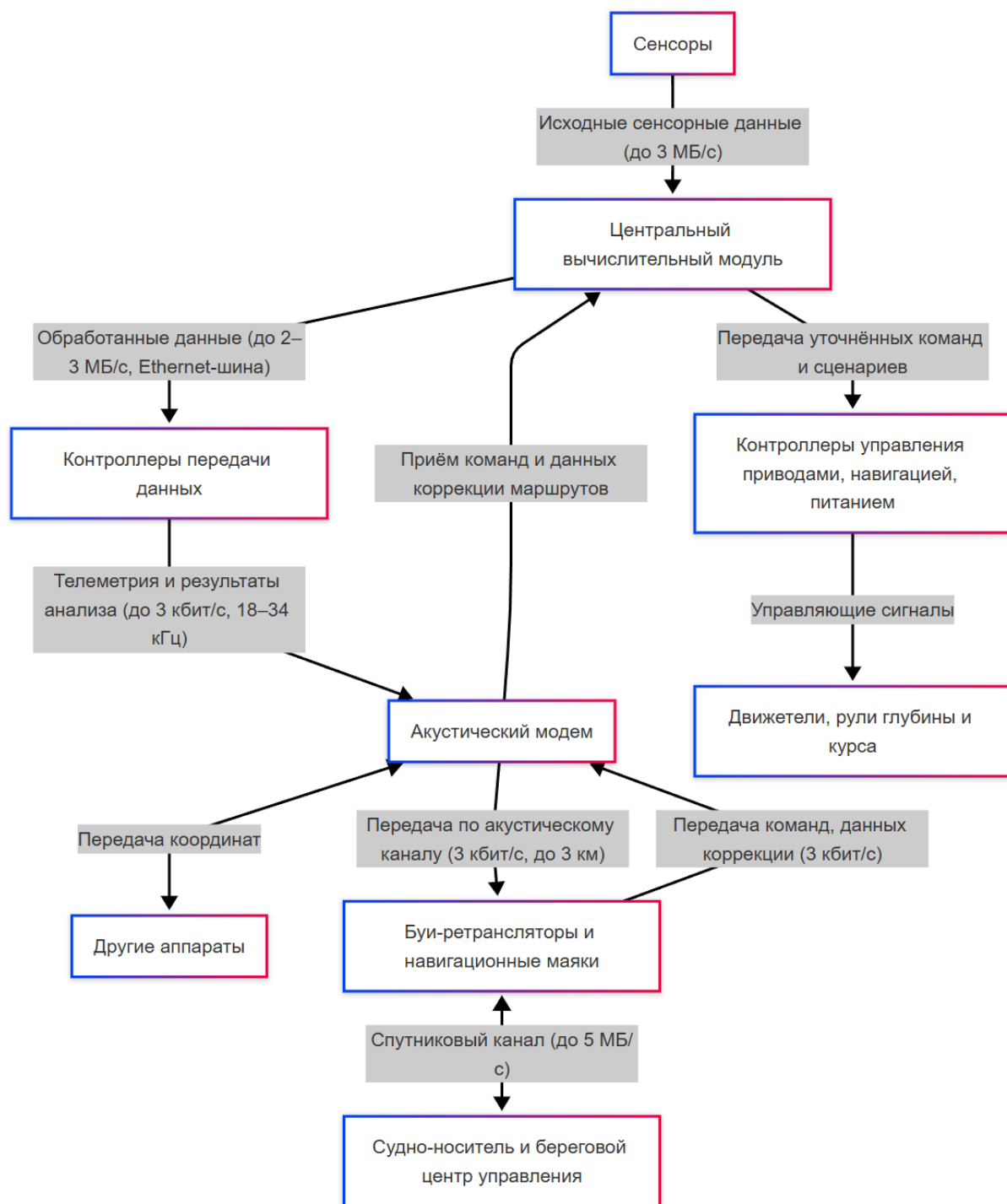


Рисунок 24 – Схема потоков данных. Вариант С. (составлено автором)

Сенсорный комплекс также модернизирован и включает высокочастотный боковой гидролокатор EdgeTech 4205 (разрешение 5–10 см), многолучевой эхолот Kongsberg EM 2040P и усовершенствованные геохимические сенсоры Sea-Bird Scientific.

Навигационный комплекс аналогичен варианту В, но дополнительно интегрирован с системой навигационных маяков LBL/USBL, обеспечивающих точность позиционирования порядка ± 1 м даже на больших дистанциях.

Связь с внешними системами осуществляется через оптимизированную сеть буёв EvoLogics S2CR 18/34 (до 3 кбит/с, до 3 км) и спутниковый канал связи при всплытии (до 5 МБ/с). Дополнительно реализовано защищённое взаимодействие с другими АНПА по специальным протоколам обмена данными. Важнейшим преимуществом является полное резервирование критически важных подсистем.

3.5 Обоснование критериев принятия решений по выбору оптимального варианта построения информационно-управляющей системы АНПА

Критерии отбора в данном методе структурно-параметрического синтеза охватывают технические и экономические параметры, а также соответствие целям минерально-сырьевого комплекса:

1. Полнота геологоразведки/мониторинга. Система должна обеспечивать съёмку рельефа без пропусков важных участков, точно фиксировать местоположение аномалий, собирать геохимические и геофизические данные в требуемом объёме.

2. Точность и стабильность навигации. Оценивается совокупная ошибка при длительной работе системы (1–2 м на 10 км движения), что критически важно для точного расположения обнаруженных месторождений на карте.

3. Надёжность. Вероятность критического сбоя за 48–72 часа не должна превышать 5%. В этой категории рассматривается наличие резервирования, а также устойчивость алгоритмов при затухании или потере связи с буями или судном.

4. Энергоэффективность. Система расходует 300–400 Вт·ч в режиме активного исследования, включая одновременную работу гидролокаторов и вычислительных блоков. Превышение этих значений приводит к сокращению полезного времени погружения и уменьшению площади обследования.

5. Совместимость с внешними системами. Аппарат должен гарантированно взаимодействовать с судном-носителем (спутниковая и радиосвязь при всплытии), буями (акустические модемы до 2–3 кбит/с), а также потенциально использовать стационарные маяки для уточнения координат.

6. Стоимость и срок службы. Избыточное усложнение конструкции увеличивает затраты на закупку и обслуживание, но даёт выигрыш в точности и автономности. Необходимо оценить “эффективность на единицу стоимости” с учётом комплексной долговременной работы в рамках геологоразведочных программ.

3.6 Выбор оптимального варианта построения информационно-управляющей системы АНПА и его оценка по совокупности единичных, комплексных и интегральных качественных и количественных показателей

На основании сформулированных критериев оценки (полнота геологоразведки, точность навигации, надёжность и устойчивость к отказам, энергоэффективность, совместимость с внешними системами, а также экономические показатели – стоимость и срок службы) был выполнен сравнительный анализ предложенных вариантов информационно-управляющей системы АНПА. Итоговые оценки представлены ниже в табличной форме (Таблица 11).

Таблица 11 - Сравнение вариантов (составлено автором)

№	Критерий оценки	Вариант А	Вариант В	Вариант С
1	Полнота геологоразведки	Средняя (ограниченная детализация, возможны пропуски)	Высокая (полная детализация, минимальны пропуски)	Высокая (полная детализация, минимальны пропуски)
2	Точность и стабильность навигации	Средняя (± 1 м на 1 км)	Высокая (до $\pm 1-2$ м на 10 км)	Высокая (до ± 1 м на 10 км)
3	Надёжность и устойчивость к отказам	Низкая (отсутствие резервирования ключевых узлов)	Средняя (частичное резервирование отдельных узлов)	Высокая (полное резервирование основных подсистем)
4	Энергоэффективность	Высокая (300–350 Вт·ч)	Средняя (400–500 Вт·ч, высокая нагрузка от параллельных вычислений)	Высокая (350–400 Вт·ч, оптимизированный режим)
5	Совместимость с внешними системами	Средняя (базовая совместимость, минимальный набор каналов связи)	Высокая (расширенная совместимость, стабильная связь с внешними системами)	Высокая (полная интеграция, постоянная устойчивая связь и кооперация с другими аппаратами и маяками)

Продолжение таблицы 11

6	Стоимость и срок службы	Низкая стоимость, малый срок службы (простота, минимальное резервирование)	Высокая (большие затраты на аппаратуру и инфраструктуру)	Средняя (оптимальный баланс затрат и срока службы за счёт гибридной архитектуры)
	Итоговая интегральная оценка	Средняя (ограниченно приемлемая)	Средняя (приемлемая, но дорогая в эксплуатации)	Высокая (наиболее предпочтительная)

На основе приведённого выше сравнительного анализа рациональных вариантов построения ИУС АНПА по заданным критериям наиболее предпочтительным признан Вариант С (гибридная архитектура), поскольку он обеспечивает наилучший баланс между высоким уровнем геологоразведочной полноты и детализации, точностью и стабильностью навигации, максимальной отказоустойчивостью за счёт резервирования критических узлов, энергоэффективностью и оптимальными затратами на интеграцию и обслуживание в течение всего срока эксплуатации. Данный вариант удовлетворяет основным техническим требованиям и задачам минерально-сырьевого комплекса, обеспечивая высокую экономическую и эксплуатационную эффективность.

3.7 Выводы по главе 3

В результате проведённой разработки метода структурно-параметрического синтеза информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата, предназначенного для решения задач минерально-сырьевого комплекса, определены рациональные варианты построения ИУС с учётом внутренних компонентов аппарата и внешних взаимодействующих систем. Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в рецензируемой научной статье [22]

В рамках синтеза были сформированы и подробно описаны три варианта архитектуры ИУС: централизованная (вариант А), распределённая (вариант В) и гибридная (вариант С). Каждый вариант рассмотрен с учётом конкретных технических параметров компонентов, таких как вычислительные платформы на базе мобильных процессоров (ARM Cortex-A72, NVIDIA Jetson AGX Orin), навигационные системы (ИНС Ekinox-E, DVL Teledyne, USBL-маяки Sonardyne Ranger 2), высокочастотные гидролокаторы, многолучевые эхолоты и специализированные геохимические сенсоры.

Важной составляющей метода синтеза стала оценка рациональных вариантов по комплексу критериев, включающих полноту геологоразведки, точность и стабильность

навигации, надёжность и отказоустойчивость, энергоэффективность, совместимость с внешними инфраструктурными системами, а также экономические показатели (стоимость и срок службы). По результатам сравнительного анализа наиболее рациональным решением признана гибридная архитектура (вариант С), поскольку именно она позволяет обеспечить оптимальный баланс между производительностью вычислительных ресурсов (на базе платформы NVIDIA Jetson AGX Orin), высокой точностью позиционирования, эффективным взаимодействием с внешними системами и приемлемыми экономическими характеристиками.

Выбранный вариант ИУС АНПА удовлетворяет всем установленным требованиям, обеспечивает надёжную эксплуатацию в условиях сложных миссий длительностью до 72 часов и гарантирует сбор геологоразведочных данных с необходимой детализацией, точностью и оперативностью. Таким образом, предложенный структурно-параметрический метод синтеза подтверждает свою эффективность при решении практических задач минерально-сырьевого комплекса, обеспечивая обоснованность выбора рационального варианта построения ИУС АНПА.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО СОЗДАНИЮ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ИНТЕРЕСАХ МИНЕРАЛЬНО- СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

4.1 Разработка математической модели и критериев оценки эффективности функционирования информационно-управляющей системы АНПА

4.1.1 Анализ уровней управления ИУС

Для синтеза системы управления АНПА, рассмотрим ИУС на различных уровнях (рисунок 25).

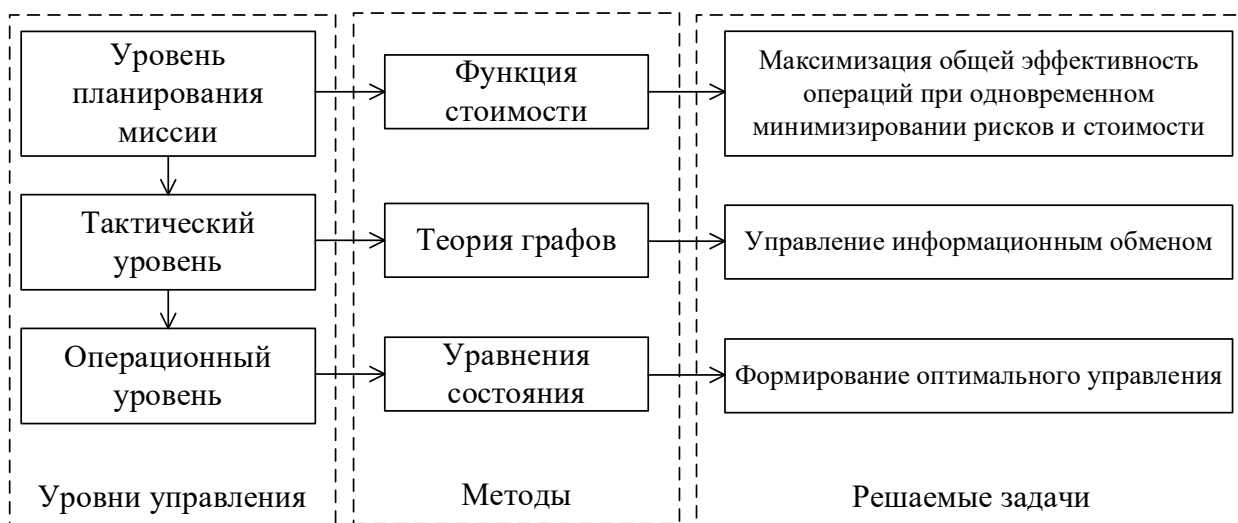


Рисунок 25 – ИУС АНПА на различных уровнях (составлено автором)

Уровень планирования миссии

Для оптимизации последовательности управляющих воздействий в динамично изменяющихся условиях используем динамическое программирование.

Задача разбивается на подзадачи, каждая из которых решается на основе решений предыдущих стадий.

Функция стоимости (67):

$$V(x) = \min_u \{f(x, u) + V(g(x, u))\}, \quad (67)$$

где $V(x)$ – функция стоимости, оптимальное значение которой нужно найти,

$f(x, u)$ – текущие затраты,

$g(x, u)$ – изменение состояния системы.

Используя этот подход, можно обеспечить эффективное и адаптивное управление миссиями АНПА, максимизируя общую эффективность операций при одновременном минимизировании рисков и стоимости.

Тактический уровень

Для анализа управления АНПА на тактическом уровне необходимо оптимизировать взаимодействия между ключевыми компонентами системы, такими как навигационные модули, сенсоры и исполнительные механизмы. Для моделирования этих взаимодействий используем сетевые модели, представленные в виде графов: $G(V, E)$, где V — узлы, соответствующие компонентам системы, а E — связи, описывающие обмен данными и ресурсами.

В качестве узлов V представим инерциальный навигатор, систему гидроакустической навигации и вычислительный блок, а рёбра E — передачу данных о текущем положении и глубине. Матрица смежности A , где a_{ij} — вес связи, используем для анализа пропускной способности и приоритезации маршрутов передачи информации.

Такой подход позволит выявить узкие места в информационном обмене и оптимизировать последовательность действий, например, для обновления маршрутов в реальном времени при наличии препятствий или изменении гидрологических условий.

Операционный уровень

На операционном уровне используем уравнения состояния для моделирования динамики АНПА:

Пусть $x(t)$ будет вектором состояния системы, включающим все релевантные параметры (положение, скорость, направление, состояние батареи).

Управление $u(t)$ представляет собой вектор управляющих воздействий (например, тяга двигателя, углы рулей).

Динамику системы можно описать дифференциальным уравнением (68):

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad (68)$$

где f — функция, описывающая, как состояние изменяется во времени в зависимости от текущего состояния и управления.

4.1.2 Обоснование принимаемых ограничений и допущений

При разработке системы управления АНПА необходимо ввести ряд допущений и ограничений, упрощающих моделирование и проектирование, но не снижающих адекватности результатов.

У аппарата должна быть нейтральная плавучесть — сила тяжести уравновешена выталкивающей силой воды, что близко к реальным условиям для большинства АНПА. Нейтральная плавучесть и продуманное размещение центров тяжести и плавучести обеспечивают естественную остойчивость аппарата (стремление сохранять горизонтальное положение). Это допущение означает, что аппарат не тонет и не всплывает самопроизвольно, упрощая контроль глубины.

АНПА должен иметь симметричную форму и удачное конструктивное балансирование, благодаря чему можно рассматривать движение в вертикальной (тангаж, глубина) и горизонтальной (курс, рыскание) плоскостях отдельно. Иными словами, динамические связи между каналами управления минимальны. Такое допущение об отсутствии сильной перекрестной связи соответствует практике использования декомпозиции системы управления на независимые контуры по курсу, глубине и скорости.

Внешние возмущения и условия окружающей среды принимаются ограниченными. Предполагается спокойное море без сильных волн и течений при выполнении задач картографирования и инспекции. Экстремальные условия (шторм, сильные течения) находятся вне допустимого диапазона для рассматриваемого метода управления. Также установим, что видимость и акустические свойства среды достаточны для работы бортовых датчиков (сонаров, камер) в пределах требуемых расстояний, что справедливо для большинства типичных условий эксплуатации. Учитываются силы сопротивления воды, гидростатические силы и сила Архимеда.

Наконец, допущения относительно навигации, поскольку сигналов GPS под водой нет, аппарат осуществляет навигацию за счет инерциальных датчиков. В данной работе не рассматривается задача глобальной навигации или высокоточного позиционирования АНПА в море, а акцент сделан на устойчивом управлении движением (стабилизация глубины, курса и скорости) и локальном избегании отклонений. Таким образом, принимается, что на промежутке выполнения задачи область работы аппарата относительно невелика, и накопленная ошибка навигации не влияет критично на выполнение задач картографирования участка или прямолинейной инспекции заданного трубопровода.

Перечисленные ограничения и допущения обоснованы тем, что позволяют сосредоточиться на ключевых аспектах системы управления и использовать упрощенную математическую модель. При этом они отражают реальные свойства большинства небольших АНПА. Как правило, аппарат проектируется нейтрально-плавучим и устойчивым, а управление строится по разделённым каналам при умеренных возмущениях. Данные предпосылки создают основу для разработки математической модели и алгоритмов управления, обеспечивая компромисс между сложностью модели и достаточной точностью для целей исследования.

4.1.3 Разработка математической модели АНПА как объекта управления

В качестве основы математической модели выбран полный комплект уравнений движения твердого тела в шести степенях свободы (6DOF) с параметризацией ориентации через углы Эйлера. Эти уравнения Ньютона–Эйлера описывают динамику аппарата как целого (на основании второго закона Ньютона для поступательного и вращательного движения) и позволяют учитывать его пространственное положение и ориентацию. Положение и ориентация

АНПА определяются в инерциальной системе координат, тогда как силы и моменты рассчитываются в связанной с аппаратом системе координат. Ось X направлена вдоль корпуса вперед, ось Y – поперек корпуса, ось Z – вертикально. Углы Эйлера определены как крен ϕ (вращение вокруг оси X), тангаж θ (вокруг оси Y) и рыскание ψ (курс, вращение вокруг вертикальной оси Z).

Векторное представление уравнений движения включает уравнения поступательного движения (для линейных скоростей u, v, w вдоль осей X, Y, Z) и уравнения вращательного движения (для угловых скоростей p, q, r вокруг осей X, Y, Z). При допущении постоянной массы m аппарата и постоянных центральных моментов инерции I_x, I_y, I_z (связанных с осями корпуса), уравнения движения в проекциях на оси связанной системы координат принимают вид (69):

$$\begin{cases} m(\dot{u} + qw - rv) = X, \\ m(\dot{v} + ru - pw) = Y, \\ m(\dot{w} + pv - qu) = Z, \\ I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr = M_x, \\ I_y \dot{q} + (I_x - I_z)pr = M_y, \\ I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq = M_z. \end{cases} \quad (69)$$

где X, Y, Z – суммарные проекции внешних сил, действующих на центр масс аппарата вдоль осей X, Y, Z ,

M_x, M_y, M_z – суммарные моменты сил относительно центра масс вокруг этих осей.

В первой группе уравнений учтены дополнительные добавки к ускорениям, отражающие эффекты вращения системы координат (так называемые силы Кориолиса и центробежные силы в связанной системе).

Во второй группе уравнений присутствуют аналогичные дополнительные члены, отвечающие за гироскопические эффекты при вращении. В разработанной модели уравнения поступательного и вращательного движения решаются совместно.

Следует отметить, что при движении под водой на аппарат также действуют силы тяжести и гидростатической выталкивающей силы, а также гидродинамические силы сопротивления и добавочной массы. В рамках данной модели для упрощения предполагается нейтральная плавучесть аппарата (сила тяжести уравновешена выталкивающей силой), поэтому гравитационные силы взаимно компенсируются и не приводят к поступательному движению. Основной вклад в ускорения аппарата вносят силы от его движителей. Гидродинамические силы сопротивления и инерционные эффекты жидкости могут учитываться дополнительными силами X_d, Y_d, Z_d и моментами $M_{x,d}, M_{y,d}, M_{z,d}$ в правой части уравнений.

Конфигурация движителей и распределение управлений

Модель учитывает конкретную конфигурацию движителей автономного необитаемого подводного аппарата, определяющую, как управляющие воздействия (тяги двигателей) распределяются по осям движения. В данном АНПА установлены пять двигателей Blue Robotics T200 в следующих точках и ориентациях:

Два погружных двигателя T200 (погружные) – расположены по левому и правому борту аппарата, обеспечивая тягу вдоль вертикальной оси. Эти двигатели направлены таким образом, чтобы создавать силу, направленную вверх или вниз (вдоль оси Z корпуса), позволяя аппарату изменять глубину (всплытие и погружение). При синхронной работе этих двигателей развивается результирующая вертикальная сила $F_z = F_{v,L} + F_{v,R}$, где $F_{v,L}$ и $F_{v,R}$ – тяги левого и правого вертикальных двигателей соответственно), приводящая к ускорению $\ddot{z}$ согласно уравнениям движения.

Два движителя T200 (горизонтальные, кормовые) – установлены в кормовой части аппарата по бортам и создают тягу вдоль продольной оси корпуса (X). Ориентация их осей совпадает с осью корпуса, что обеспечивает движение вперед или назад (продольное поступательное движение, или движение вдоль X). При равной мощности обоих кормовых двигателей развивается суммарная сила тяги $F_x = F_{x,L} + F_{x,R}$, направленная вдоль оси X (положительное значение – движение вперед), и аппарат ускоряется в продольном направлении ($\ddot{x}$ согласно уравнениям движения).

Один поворотный носовой двигатель T200 – установлен в носовой части аппарата и способен поворачиваться в горизонтальной плоскости. Этот двигатель служит рулем курса: работая, он создает боковую силу на носу аппарата, порождая управляющий момент вокруг вертикальной оси (M_z) и тем самым изменяя курс (угол рыскания ψ).

В модели носовой двигатель ориентируется перпендикулярно оси корпуса и создаёт чистый момент рыскания (при незначительном поперечном перемещении аппарата). Обозначим горизонтальную силу, развиваемую носовым движителем, как F_n (направленную вбок), а расстояние от точки приложения этой силы до центра масс аппарата как L_n (плечо силы в горизонтальной плоскости), то приближенно возникающий момент рыскания можно выразить как $M_z \approx F_n \cdot L_n$. В реальном аппарате эта боковая сила также вызовет небольшое боковое перемещение (ускорение вдоль оси Y) и крен при высоком расположении двигателя, однако при моделировании в контуре управления эти эффекты малы и будем учитывать только момент.

Учитывая изложенную конфигурацию, сопоставим каждую степень свободы движения с определенными исполнительными органами (двигателями).

Продольное движение (ось X , скорость u) контролируется парой гребных двигателей с суммарной тягой F_x .

Вертикальное движение (ось Z , скорость w , глубина) контролируется парой погружных двигателей с суммарной силой F_z .

Курс (рыскание вокруг оси Z , угловая скорость r и угол ψ) контролируется носовым двигателем через момент M_z .

Поперечное горизонтальное перемещение (ось Y , скорость v) непосредственно не задаётся отдельным двигателем (отсутствует специальный бортовой движитель), однако аппарат может изменить свою боковую позицию, комбинируя поворот по курсу и движение вперед. Наконец, рыскание (ψ) и крен (ϕ) как вращательные степени свободы в данной конфигурации активно контролируются (курсом – носовым двигателем, крен – при необходимости дифференциалом вертикальных), тогда как тангаж (θ , вращение вокруг оси Y) не имеет отдельного привода и является пассивно устойчивым за счет распределения масс и плавучести.

Динамика двигателей T200 (передаточные функции)

Для более точного воспроизведения поведения аппарата как объекта управления необходимо учесть динамические свойства приводов (двигателей). Каждый двигатель T200 имеет инерционность и задержки отклика, обусловленные электромеханическими и гидродинамическими процессами (инерция винта, добавочная масса воды, сопротивление и т.д.). В модели эти свойства учтены с помощью передаточных функций, полученных путем идентификации по экспериментальным данным. Идентифицированная динамика каждого двигателя T200 представлена в виде линейной непрерывной передаточной функции 4-го порядка (модель разработана производителем движителей T200, компанией Blue Robotics) (70):

$$W_{T200}(s) = \frac{-107s^2 + 8.358 \times 10^4 s + 3.989 \times 10^4}{s^4 + 152.9s^3 + 3.036 \times 10^4 s^2 + 2.93 \times 10^6 s + 1.157 \times 10^6}, \quad (70)$$

где входом является управляющее воздействие на двигатель, задаваемая ШИМ-сигналом скорость вращения, а выходом – достигнутое значение тяги (силы), развиваемой двигателем. Данная передаточная функция характерна для движителей Blue Robotics T200 и отражает типичный для них колебательно-апериодический отклик: наличие пар комплексно-сопряженных корней в знаменателе (четвертый порядок) свидетельствует о присутствии колебательных звеньев, связанных с гибкостью крепления или резонансами потока, а нули в числителе определяют частотные свойства вносимого звеном усиления/затухания на разных режимах. Статический коэффициент передачи этой модели близок к единице по усилению (при постоянном сигнале двигатель в установившемся режиме развивает пропорциональную команде тягу), однако динамически при резком изменении управляющего сигнала фактическая тяга будет достигать нового значения с определенной задержкой и перерегулированием.

Именно поэтому включение модели двигателя в виде передаточной функции важно для адекватного прогнозирования поведения аппарата при активных маневрах.

4.2 Разработка имитационной модели функционирования информационно-управляющей системы АНПА в среде MATLAB/SIMULINK

Для имитации динамики аппарата в режиме реального времени и последующей разработки системы управления, описанная математическая модель реализована в среде MATLAB/Simulink (Рисунок 26).

Основой схемы является стандартный блок 6DOF (Euler Angles) из библиотеки Aerospace Blockset, который интегрирует уравнения движения в шести степенях свободы (Рисунок 27). Этот блок принимает на вход суммарные силы $[X, Y, Z]$ и суммарные моменты $[M_x, M_y, M_z]$, приложенные к центру масс аппарата. Затем вычисляет отклик системы – на выходе блока формируются

- текущее положение аппарата (в виде координат по осям Земли X_e, Y_e, Z_e);
- линейные скорости (u, v, w) в осях аппарата;
- углы Эйлера (ϕ, θ, ψ) ;
- угловые скорости (p, q, r) вокруг осей аппарата.

Параметры блока (масса, тензор инерции) настроены согласно физическим характеристикам рассматриваемого АНПА. Координатные оси блока согласованы с принятой системой: оси тела (X_b, Y_b, Z_b) совпадают с осями аппарата, а плоская система Земли (X_e, Y_e, Z_e) выбрана с осью Z_e направленной вниз (что соответствует использованию углов Эйлера с определением курса ψ вокруг вертикали).

Входные суммарные силы и моменты формируются из моделей двигателей, описанных выше. В Simulink каждый двигатель представлен цепочкой: входной управляющий сигнал (например, требуемая тяга или нормированный сигнал) поступает на блок передаточной функции данного двигателя T200, на выходе которого получается текущая сила тяги этого движителя. Далее эта сила направляется на суммирование в соответствующей ветви сил и моментов.

Для вертикальных двигателей (левого и правого) их выходные силы суммируются и подаются как суммарная сила по оси Z на вход блока 6DOF. При этом, чтобы учесть возможное смещение двигателей от центра масс в поперечном направлении, разность сил этих двух двигателей вычисляется и через плечо формирует добавочный момент крена M_x (в модели это реализовано как отдельный вычислительный блок, умножающий разность тяги на расстояние между двигателями и подающий результат на канал M_x).

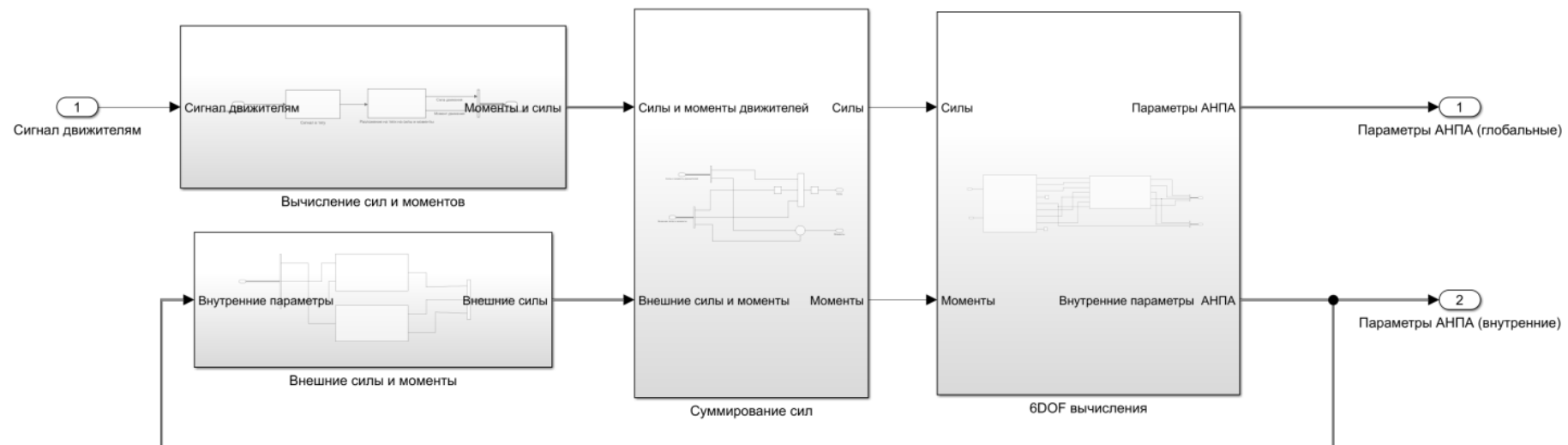


Рисунок 26 - Модель функционирования ИУС АНПА в среде MATLAB/SIMULINK (составлено автором)

Для кормовых гребных двигателей (левого и правого) их тяги суммируются в продольном канале и формируют силу X , подаваемую на вход 6DOF-блока.

Для носового поворотного двигателя в реализации модели выбрана схема с непосредственной подачей момента M_z от носового двигателя, что упрощает систему (избегается необходимость учитывать точку приложения и порождаемый боковой дрейф). То есть выход передаточной функции носового двигателя (развиваемая им сила F_n) умножается на расчетное плечо L_n и подается на вход блока 6DOF в канал M_z . Это обеспечивает поворот аппарата по курсу пропорционально тяге носового движителя (Рисунок 28).

Все перечисленные связи реализованы в Simulink с помощью сумматоров и функциональных блоков. Силы от двигателей через передаточные функции собираются на трех сумматорах для осей X , Y , Z , формируя вектор $[X, Y, Z]$. Аналогично, моменты суммируются на узлах для M_x , M_y , M_z .

Таким образом, итоговая имитационная модель АНПА представляет собой совокупность: блок 6DOF (Euler Angles), интегрирующий уравнения движения, и подключенные к нему модели приводов (передаточные функции двигателей) через систему распределения сил и моментов. Эта модель адекватно описывает поведение аппарата как объекта управления, позволяя на последующих этапах проектировать и отлаживать алгоритмы стабилизации и управления движением (по курсу, глубине, скорости хода) с учетом динамики как самого аппарата, так и его исполнительных органов.

4.3 Разработка системы информационного обеспечения АНПА

Для успешной реализации задач картографирования и инспекции необходима надежная система информационного обеспечения – совокупность бортовых датчиков, вычислительных средств и алгоритмов, обеспечивающих восприятие окружающей среды, оценку состояния аппарата и передачу данных оператору.

В разработанной ИУС АНПА реализован следующий состав средств информационного обеспечения.

Аппарат оснащается инерциальным модулем (гироскопы и акселерометры) и магнитометром для измерения курса, крена и тангажа. Также установлен датчик глубины (преобразователь давления) для точного измерения текущей глубины погружения. Эти датчики с высокой частотой выдают информацию о положении и ориентации аппарата, необходимую для замкнутой системы управления.

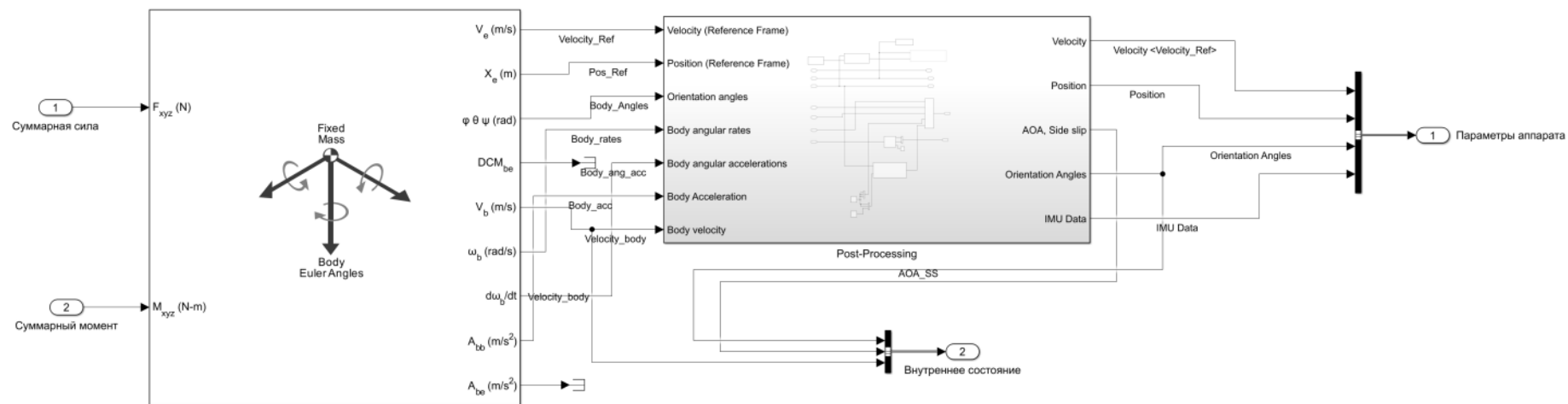


Рисунок 27 - Блок 6DOF вычисления (составлено автором)

Аппарат оснащается инерциальным модулем (гироскопы и акселерометры) и магнитометром для измерения курса, крена и тангажа. Также установлен датчик глубины (преобразователь давления) для точного измерения текущей глубины погружения. Эти датчики с высокой частотой выдают информацию о положении и ориентации аппарата, необходимую для замкнутой системы управления.

Для решения прикладных задач в интересах минерально-сырьевого комплекса используются специализированные сенсоры. Картографирование дна осуществляется с помощью бокового гидролокатора. Обследование трубопроводов будет может выполняться с применением подводной видеокамеры высокого разрешения в сочетании с источниками света.

В нашем случае, учитывая ограниченные размеры прототипа и условия испытаний, сделан упор на визуальный канал: на носу аппарата установлена герметичная видеокамера, способная в чистой воде обнаруживать стенки трубопровода на расстоянии нескольких метров. В будущем, для работы в мутной воде, возможна интеграция компактного сонарного датчика.

При автономной работе под водой радиосвязь невозможна, поэтому в прототипе предусмотрены два режима получения данных. Первый – запись данных на борту (например, на карту памяти) для их анализа после подъема аппарата на поверхность. Второй – связь с надводным наблюдателем при помощи акустического модема.

Все датчики и исполнительные устройства связаны с бортовым вычислителем – контроллером АНПА. В прототипе в качестве главного контроллера применяется одноплатный компьютер Raspberry Pi 4 с ОС Linux, на котором развернута программа автопилота и сбор данных. Наш контроллер выполняет несколько задач одновременно: считывание данных датчиков (через интерфейсы I²C и SPI для IMU и давления, USB для камеры), вычисление управляющих воздействий ПИД-регуляторов, логирование параметров, а также обмен данными с наземной станцией. Реализована многопоточная программа на языке C++ (Рисунок 29). Частота обновления контуров управления – 10 Гц, что с запасом достаточно для динамики нашего аппарата.

В состав информационной системы входит и наземная часть – интерфейс мониторинга, позволяющий наблюдать за параметрами АНПА и при необходимости вмешиваться. На интерфейс мониторинга получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [24]. На экране оператора в реальном времени отображаются текущая глубина, курс, скорость, положение рулей/двигателей, а также графики этих параметров во времени. Это позволяет анализировать работу системы управления и состояние аппарата во время испытаний. Также предусмотрен режим записи телеметрии в файл для последующего статистического анализа.

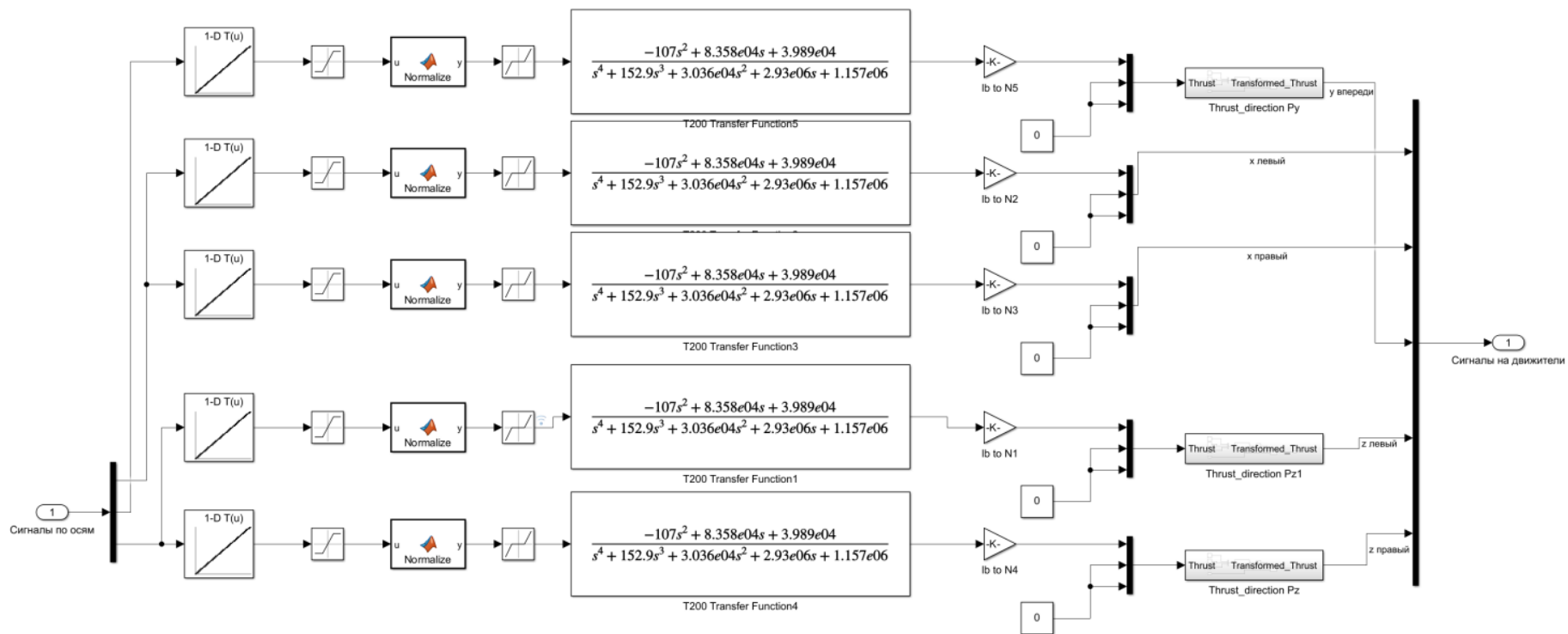


Рисунок 28 - Преобразование ШИМ сигнала в движущую силу (составлено автором)

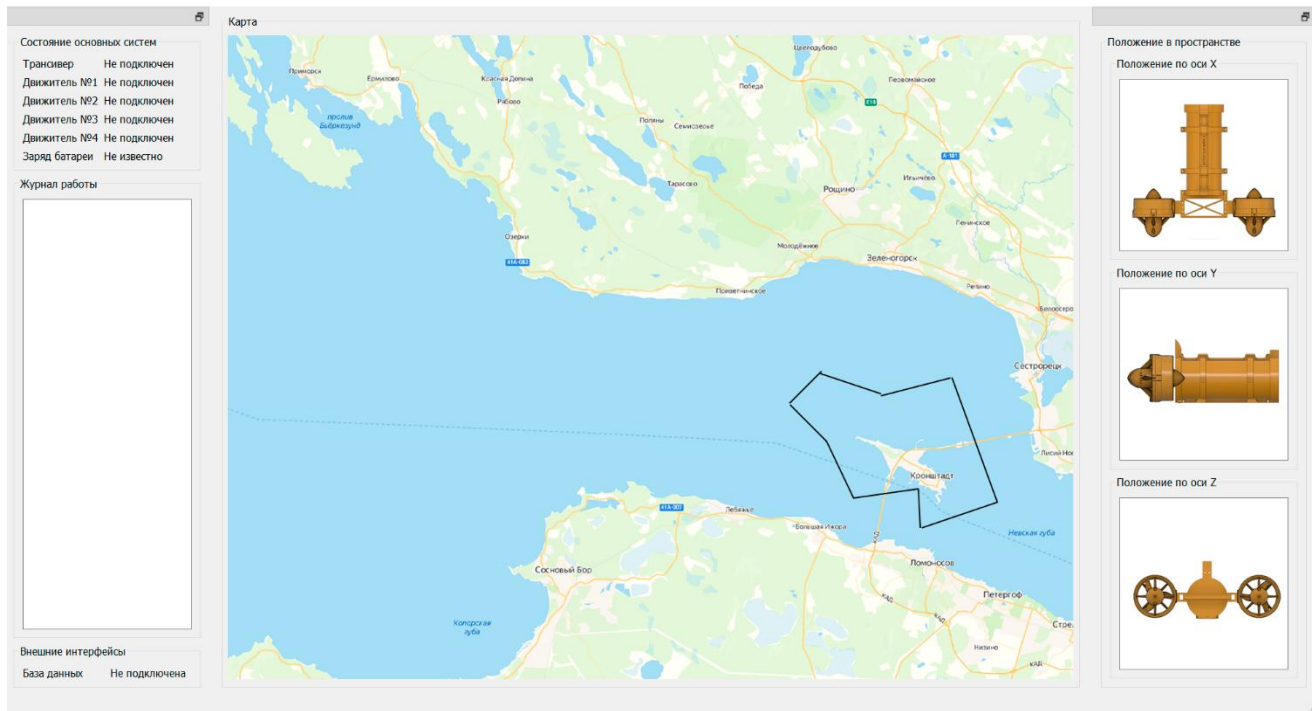


Рисунок 29 – Программа мониторинга ИУС АНПА (составлено автором)

Таким образом, система информационного обеспечения АНПА представляет собой комплекс взаимодействующих компонентов:

- датчики (обеспечивают информацию о состоянии и окружающей обстановке);
- бортовой вычислитель (обрабатывает информацию и принимает решения управления);
- средства связи/интерфейсы (передают информацию оператору и позволяют задать командные параметры).

В сочетании они позволяют аппарату автономно ориентироваться в среде и решать целевые задачи. Особое внимание уделено датчикам, связанным с задачами минерально-сырьевого комплекса. При картографировании важно точное измерение глубины, при инспекции трубопровода – надежное его обнаружение и следование. Заложенная архитектура информационной системы модульна, в нее можно добавлять новые датчики (например, химические сенсоры для обнаружения утечек или магнитометры для нахождения трубопроводов под слоем грунта) без существенной переработки остальной системы, что обеспечивает гибкость решения для различных сценариев.

4.3.1 Разработка системы управления АНПА

Система управления АНПА спроектирована на основе классической многоконтурной схемы автопилота, включающей независимые регуляторы для поддержания заданной глубины, курса и скорости. Основу алгоритма управления составляют три контура ПИД-регуляторов

(пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов), настроенных на соответствующие каналы: контур глубины, контур курса и контур скорости хода (Рисунок 30)).

Такое решение выбрано благодаря простоте реализации и доказанной эффективности ПИД-алгоритмов для задач стабилизации движения подводных аппаратов. Ниже описана структура системы управления и особенности настройки каждого контура.

Управление организовано по принципу отдельных каналов: выход каждого контроллера действует на свою исполнительную подсистему, а нежелательные связи между каналами минимизированы конструкцией аппарата.

Контур глубины получает на вход отклонение по глубине ($e_h = h_{\text{зад}} - h_{\text{текущее}}$), где h – глубина) и выдает требуемую тягу вертикального двигателя T_z .

Контур курса стабилизирует направление движения аппарата. На вход ему подается ошибка курса ($e_\psi = \psi_{\text{зад}} - \psi_{\text{текущее}}$), а на выходе формируется управляющий сигнал на поворотном движителе T_y .

Контур скорости отвечает за поддержание требуемой продольной скорости хода. Его вход – разница между желаемой скоростью и текущей ($e_u = u_{\text{зад}} - u_{\text{текущее}}$), выход – сигнал управления движителем.

Алгоритм координации контуров. Перед поворотом по курсу скорость автоматически снижается, чтобы уменьшить радиус циркуляции и облегчить удержание курса.

Настройка ПИД-регуляторов проведена с использованием модели АНПА и имитации в MATLAB/Simulink. Сначала каждый контур настраивался отдельно. Был использован аналитический подход, на базе настройки ПИД регуляторов в MATLAB/Simulink.

4.4 Оценка устойчивости и качества управления АНПА при решении задач в интересах минерально-сырьевого комплекса

Для подтверждения работоспособности и валидации параметров разработанного алгоритма автоматического управления автономного необитаемого подводного аппарата была проведена серия виртуальных испытаний в среде MATLAB/Simulink.

Для оценки устойчивости и качества системы заданы три типовых сценария миссий (Таблица 12).

Таблица 12 - Три типовых сценария миссий ИУС АНПА для МСК

№	Сценарий	Краткое описание
1	Выход на позицию	Переход из начальной точки А в точку В.
2	Движение галсами	Картографирование участка дна прямолинейными галсами с фиксированной глубиной.
3	Движение на различных глубинах	Плавное изменение глубины

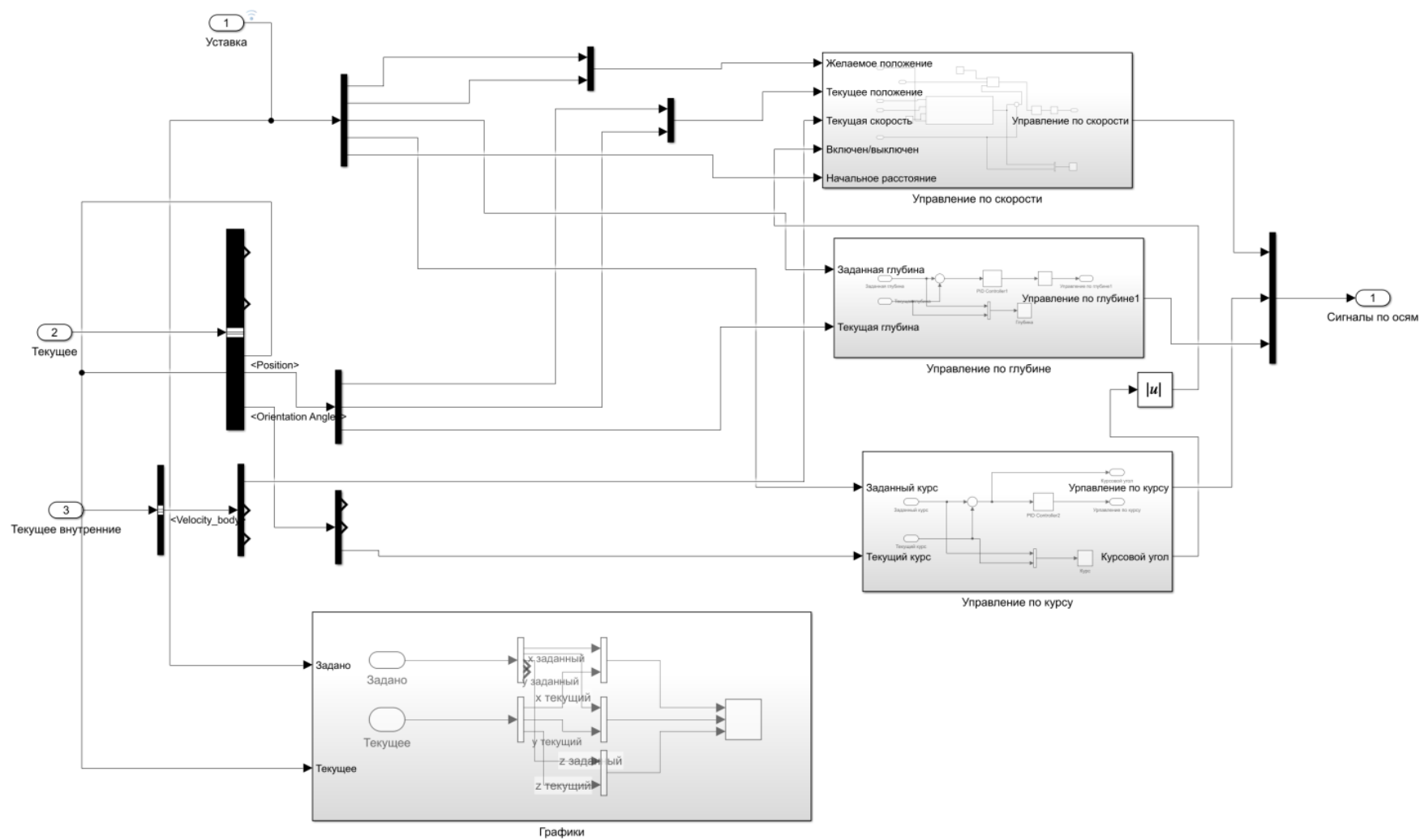


Рисунок 30 - Система ПИД регуляторов (составлено автором)

На рисунке 31 показана трёхмерная траектория аппарата по достижению заданной позиции. Путь характеризуется плавным спуском по глубине и последующим поворотом для выхода на требуемый курс к конечной точке.

На следующих рисунках представлены графики переходного процесса по:

- глубине (Рисунок 32);
- скорости (Рисунок 33);
- курсу (Рисунок 34).

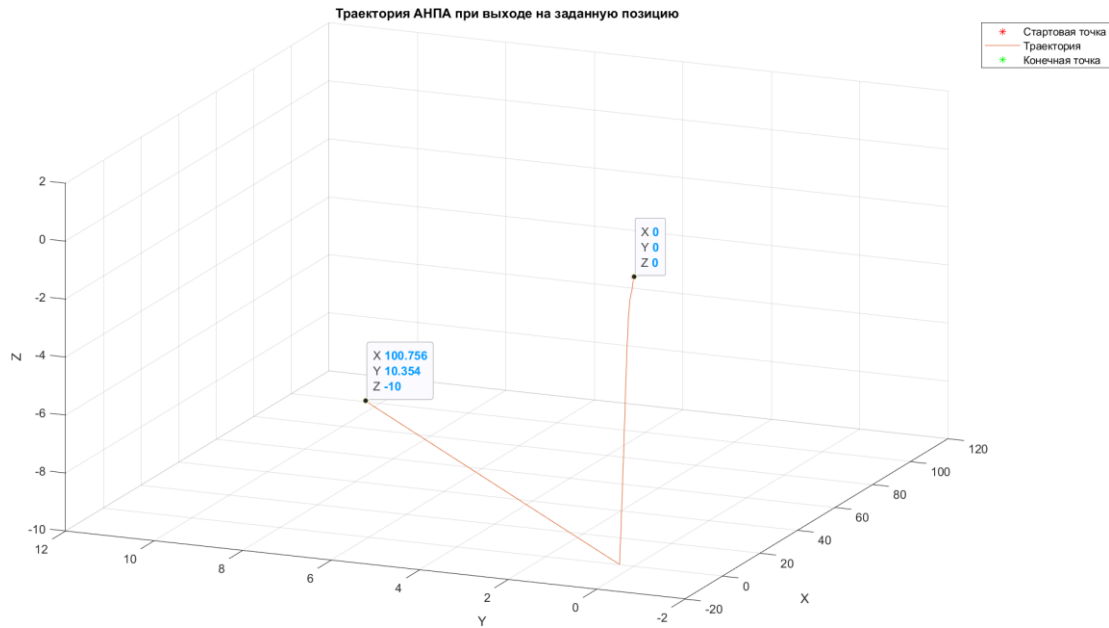


Рисунок 31 – Траектория АНПА при выходе на заданную позицию (составлено автором)

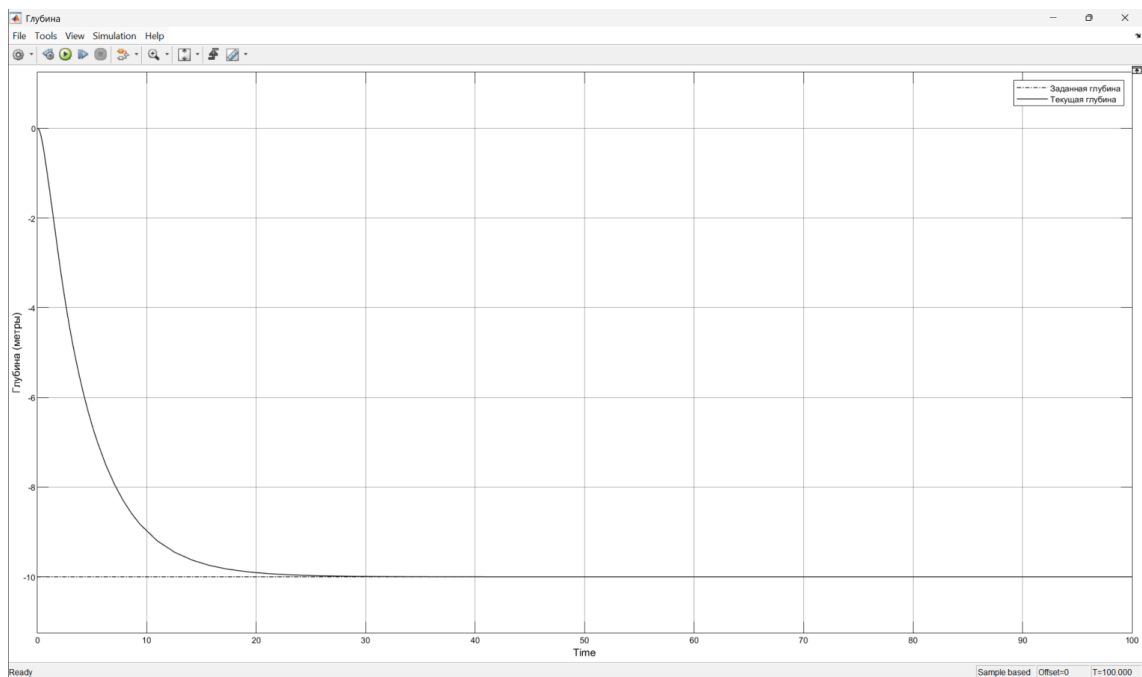


Рисунок 32 – Выход на заданную позицию. Переходный процесс по глубине (составлено автором)

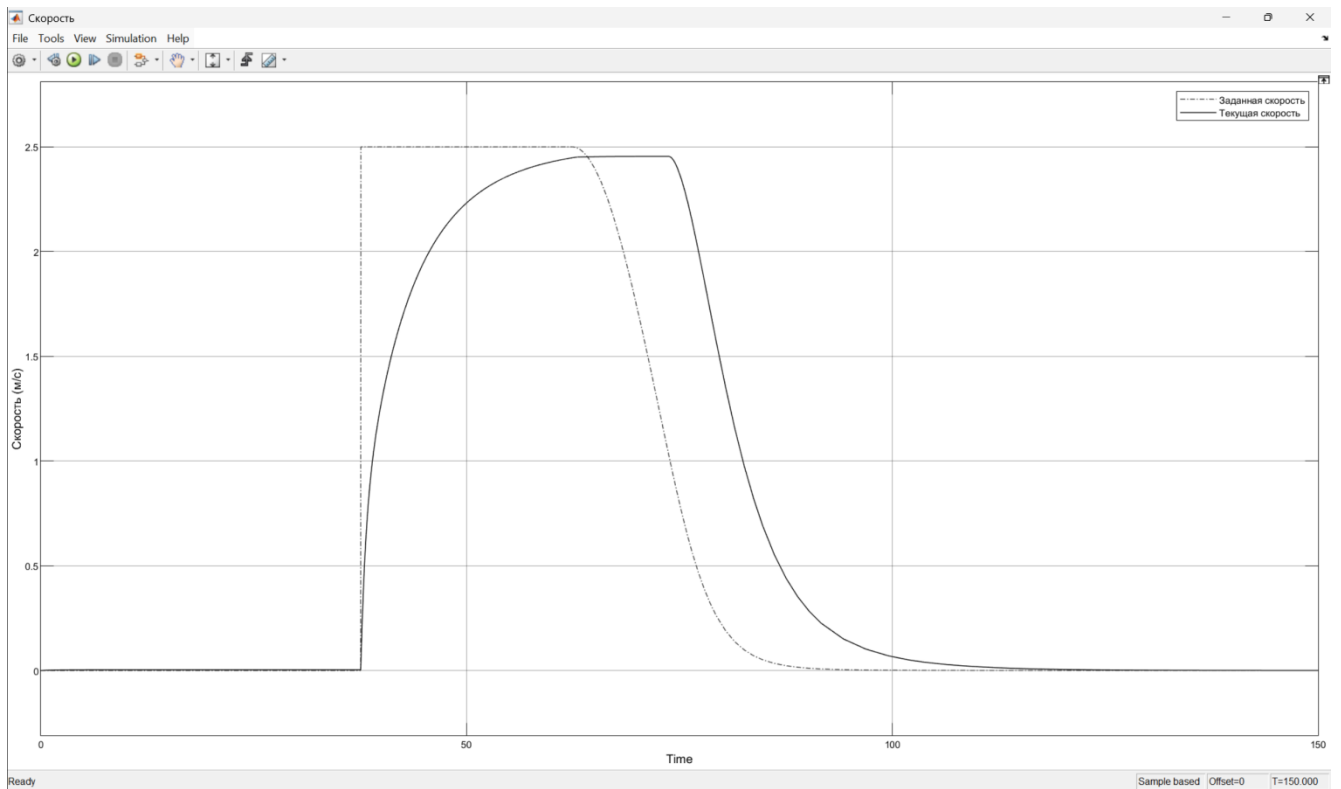


Рисунок 33 – Выход на заданную позицию. Переходный процесс по скорости (составлено автором)

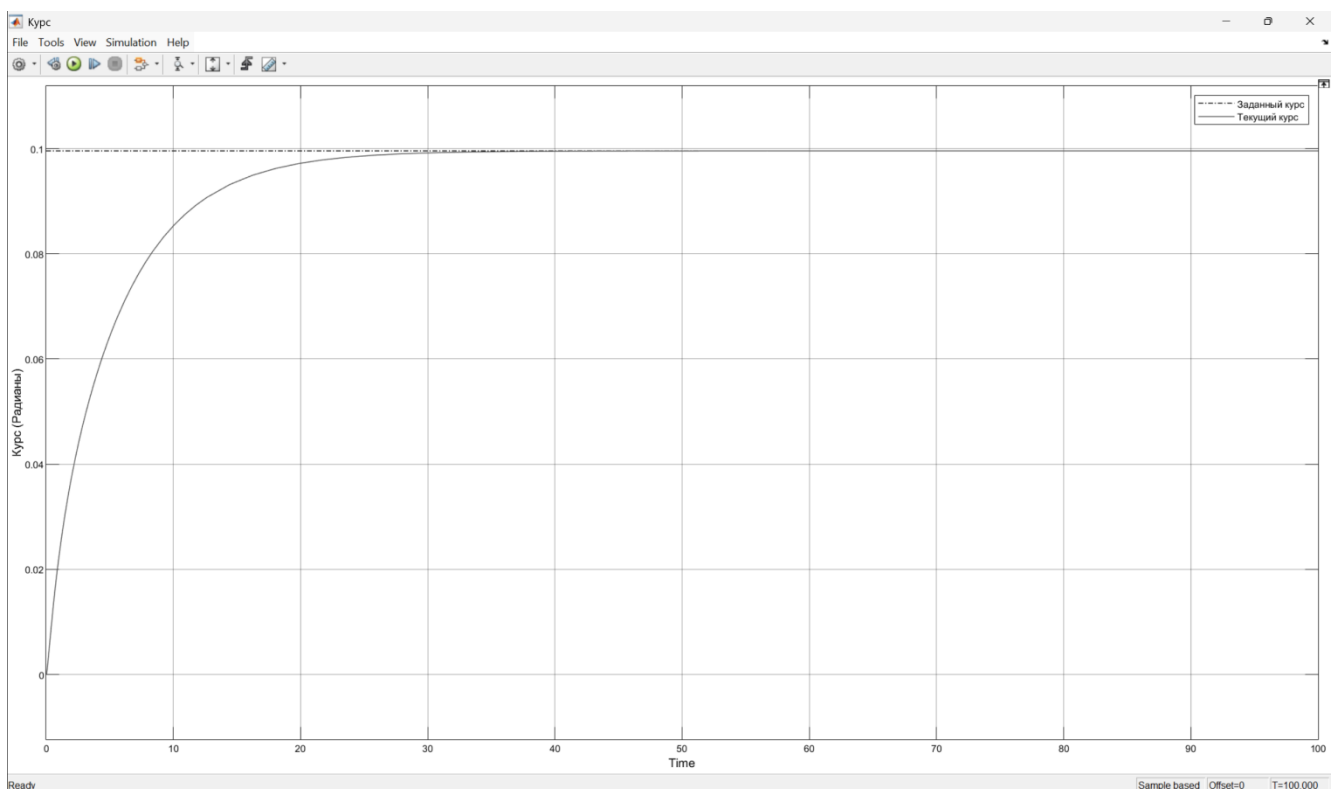


Рисунок 34 – Выход на заданную позицию. Переходный процесс по курсу (составлено автором)

Анализ графиков переходного процесса.

Глубина. Переходная характеристика имеет ярко выраженный апериодический характер первого порядка. Спуск к отметке -10 м происходит без колебаний: время нарастания (10–90 %)

≈ 7 с, перерегулирование отсутствует, время установления ($\pm 2\%$) — 18 с. Расчётная постоянная времени управления по глубине составляет $\sim 4,2$ с, что указывает на достаточный динамический запас.

Продольная скорость. После подачи ступенчатой команды ($t = 30$ с) аппарат разгоняется экспоненциально и достигает 2,5 м/с за ≈ 24 с. После сброса задания скорость убывает и полностью устраняется к $t \approx 115$ с, что подтверждает достаточный демпфирующий коэффициент канала тяги.

Курс. На канал задаётся ступенчатое отклонение 0,1 рад ($\approx 5,7^\circ$). Апериодический подъём проходит без перерегулирования: время нарастания ≈ 9 с, время установления ≈ 27 с. Нулевая статическая ошибка обеспечивается интегральной составляющей ПИД-регулятора, а отсутствие колебаний свидетельствует о фазовом запасе не менее 50° .

На рисунке 35 показана трёхмерная траектория аппарата при движении галсами вдоль прямоугольного участка дна. Выделяются 11 прямолинейных проходов длиной ~ 120 м каждый и последовательные повороты, выполняемые при заданной глубине.

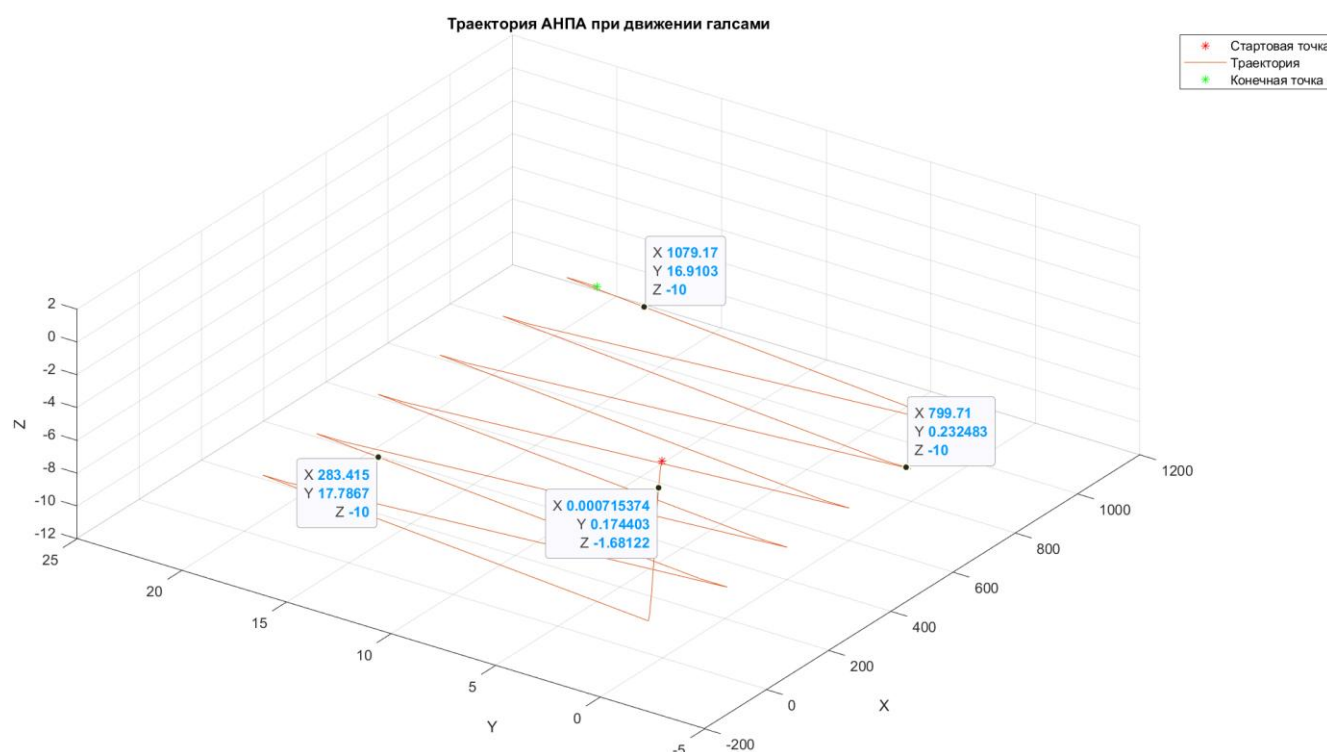


Рисунок 35 – Траектория АНПА при движении галсами. (составлено автором)

На следующих рисунках представлены графики переходного процесса по:

- глубине (Рисунок 36);
- скорости (Рисунок 37);
- курсу (Рисунок 38).

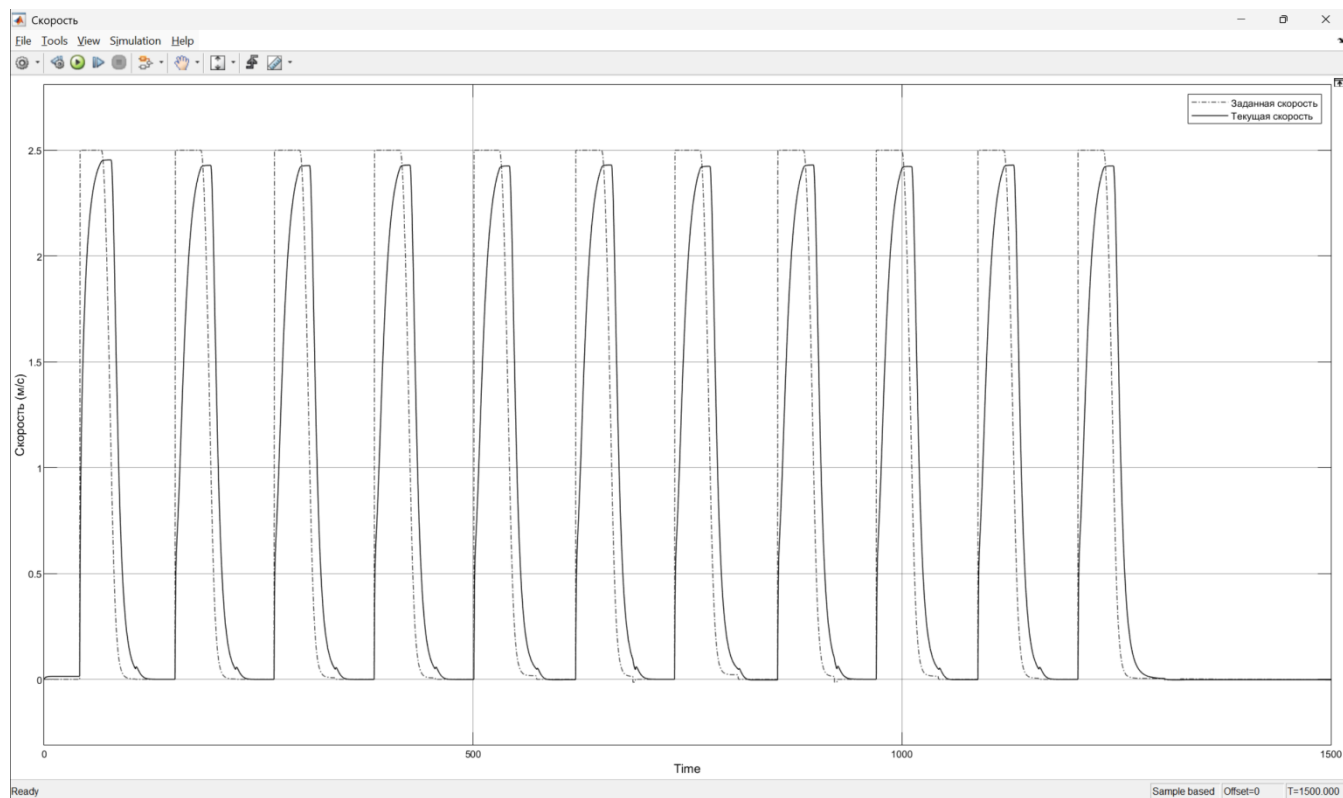


Рисунок 36 – Движение галсами. Переходный процесс по скорости (составлено автором)

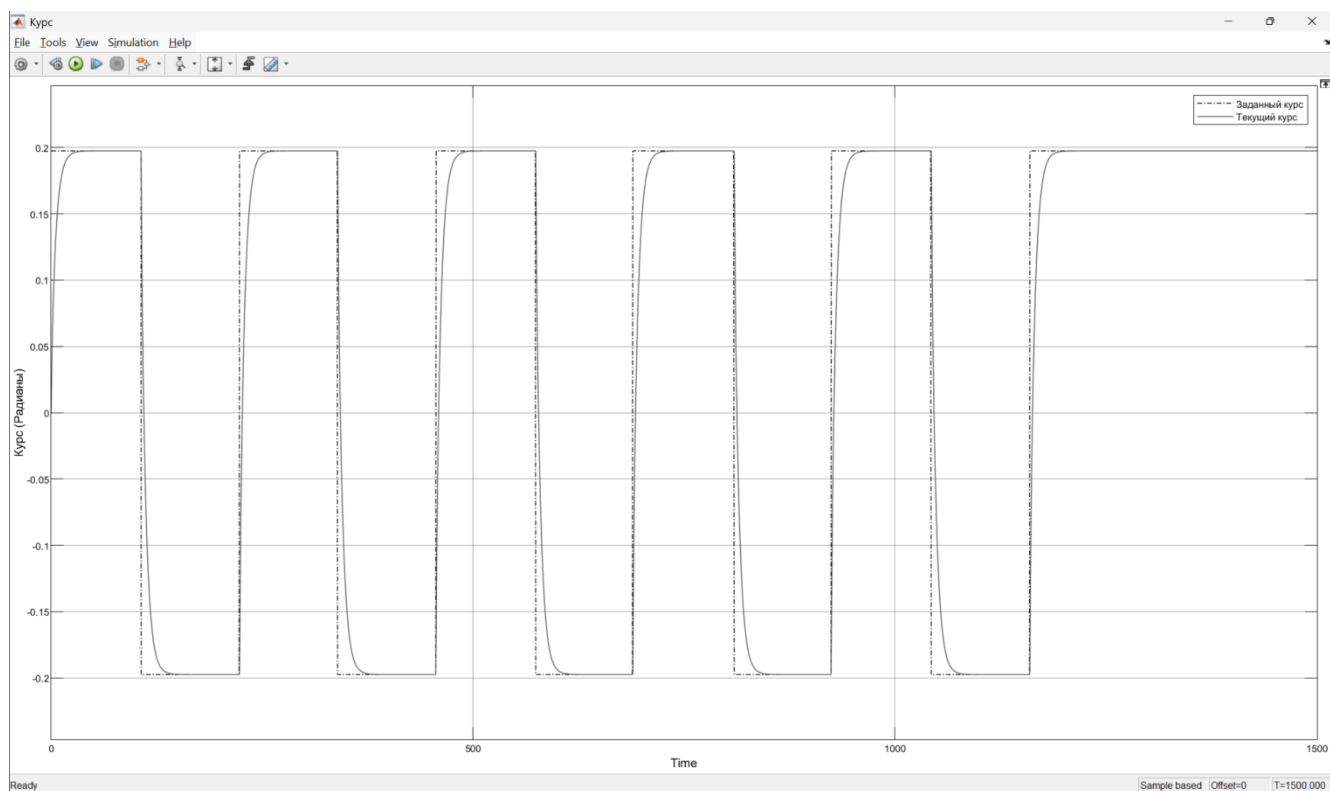


Рисунок 37 – Движение галсами. Переходный процесс по курсу (составлено автором)

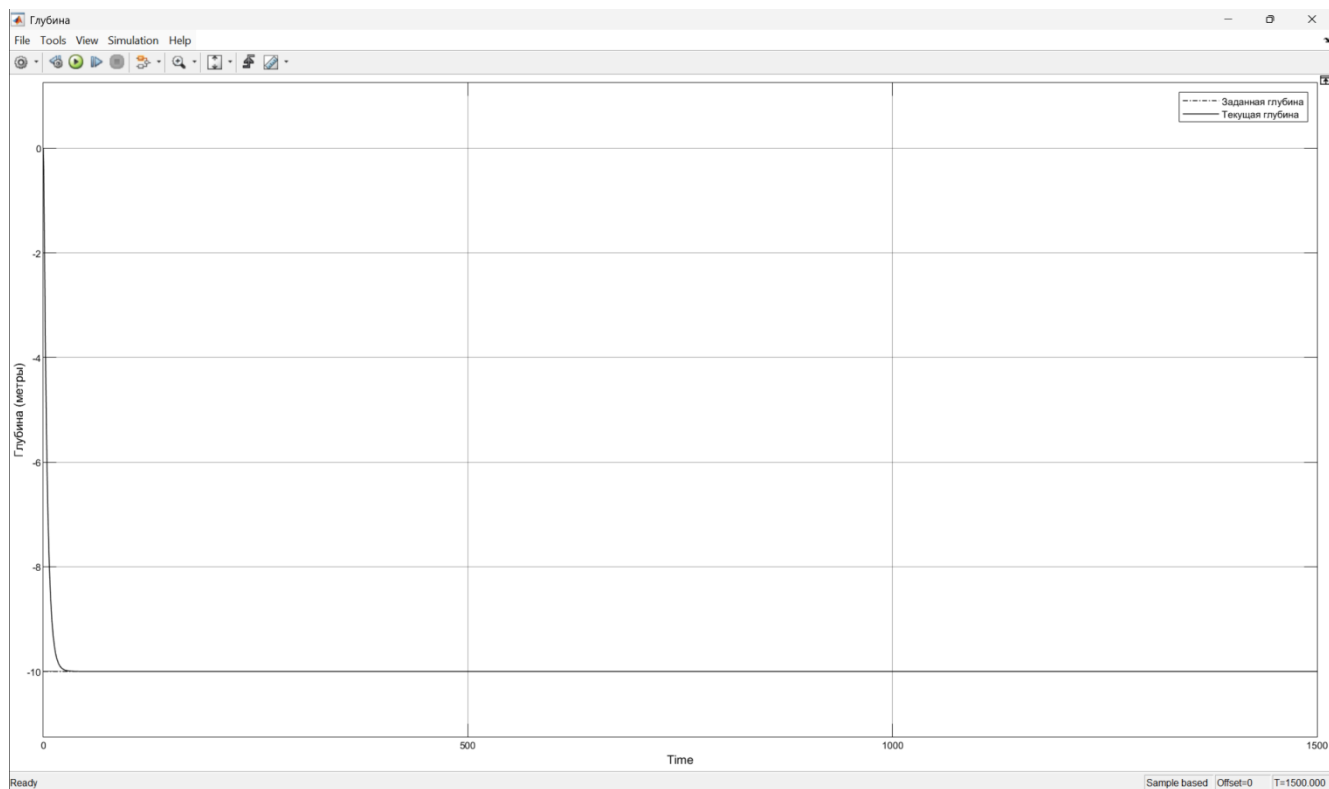


Рисунок 38 – Движение галсами. Переходный процесс по глубине (составлено автором)

Анализ графиков переходного процесса.

Глубина. На всём протяжении миссии глубина удерживается вблизи -10 м; интегральное отклонение не превышает $0,03$ м, мгновенное — $\pm 0,05$ м. Колебания отсутствуют, что подтверждает апериодический характер канала.

Скорость. На каждом прямом галсе задаётся ступенчатое ускорение до $2,5$ м/с; аппарат достигает цели за $12\text{--}15$ с, перерегулирование $< 5\%$ ($\approx 0,12$ м/с). При торможении реальный отклик слегка опережает эталон из-за кинетической энергии винта, но полностью затухает через ~ 10 с. Среднеквадратичная ошибка слежения $0,06$ м/с.

Курс. Развороты выполняются двумя последовательными ступенчатыми заданиями $\pm 0,2$ рад ($\approx \pm 11,5^\circ$). Время нарастания ≈ 8 с, перерегулирование $\leq 3\%$, время установления $25\text{--}30$ с. При прямолинейном ходе постоянная ошибка $< 0,3^\circ$, что гарантирует перекрытие полос обзора соседних галсов.

В целом система управления обеспечивает устойчивое и повторяемое выполнение шаблона «галсы» без накопления ошибки и без возникновения автоколебаний.

На рисунке 39 показана трёхмерная траектория аппарата при выполнении комплексного профилирования глубины. Из стартовой точки $(0, 0, 0)$ аппарат выполняет вертикальное погружение до -10 м, затем последовательно проходит серию ступенчатых изменений глубины, продолжая поступательное движение вперёд (X-координата растёт до ≈ 300 м):

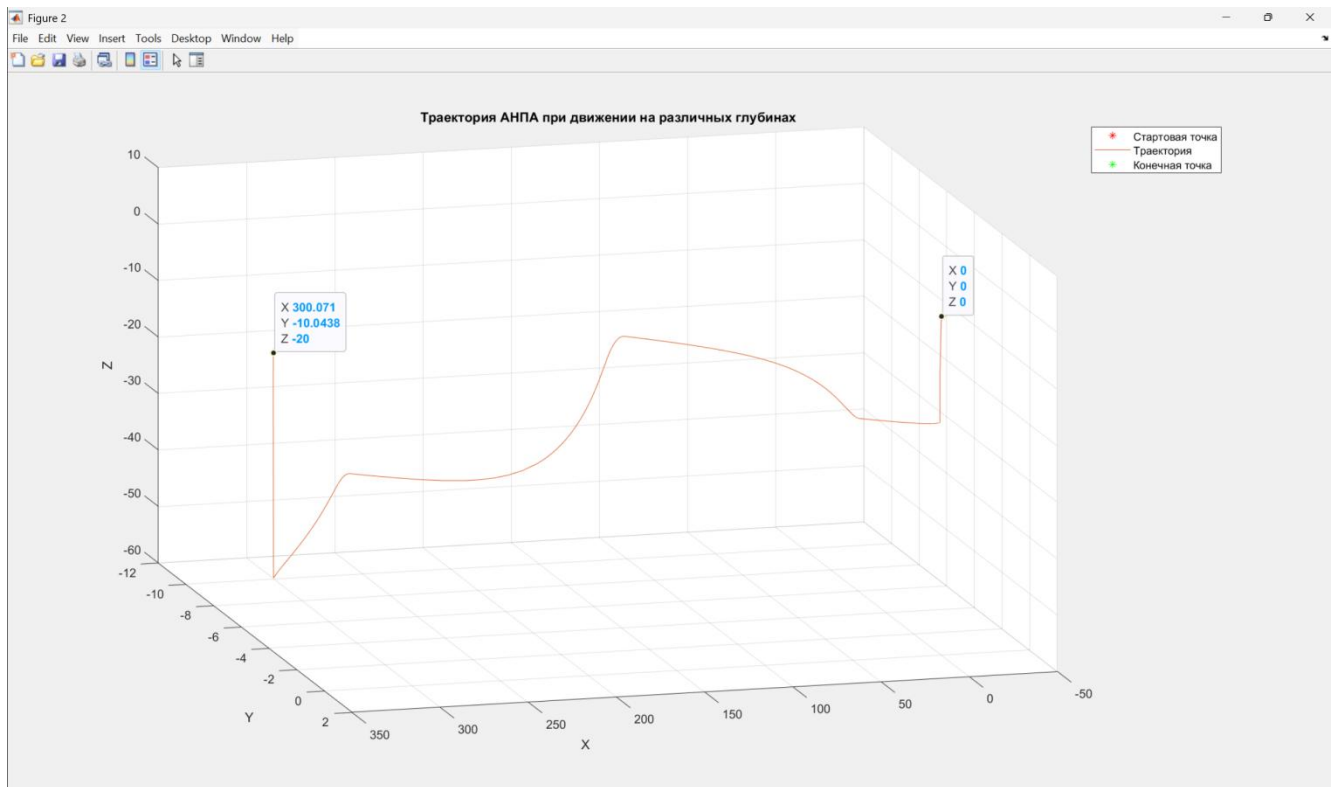


Рисунок 39 – Траектория АНПА при движении на различных глубинах (составлено автором)

На следующих рисунках представлены графики переходного процесса по:

- глубине (Рисунок 40);
- скорости (Рисунок 41);
- курсу (Рисунок 42).

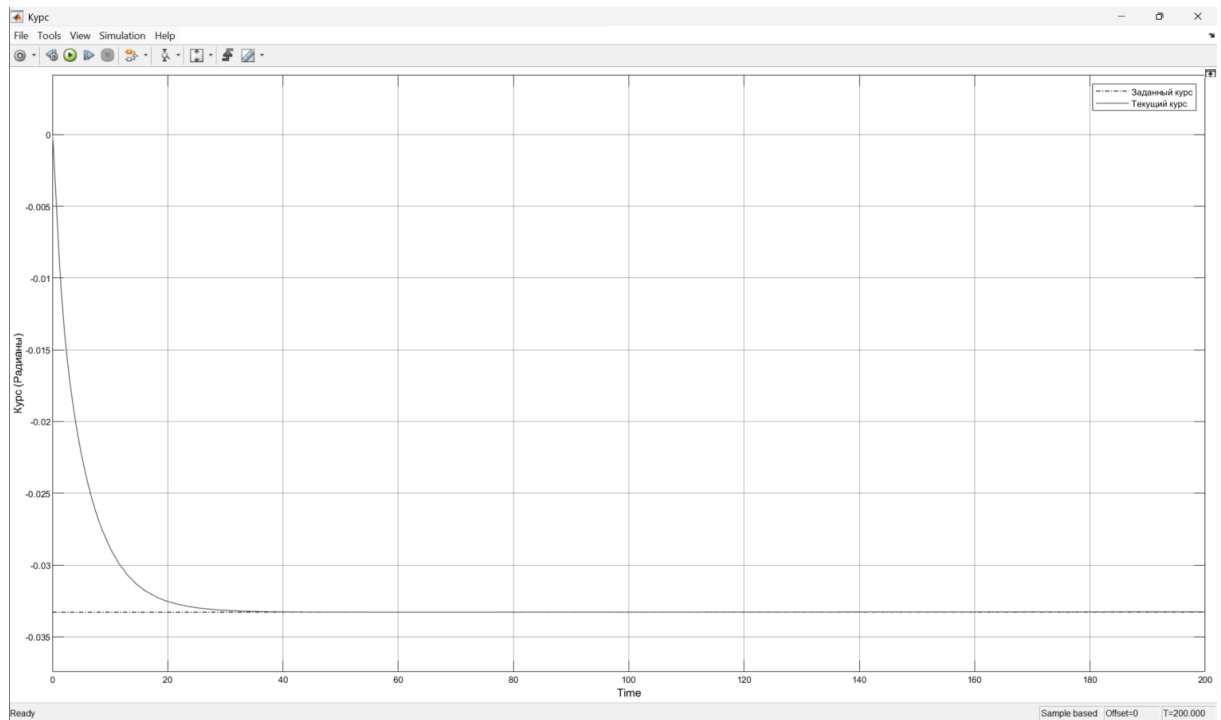


Рисунок 40 – Движении на различных глубинах. Переходный процесс по курсу (составлено автором)

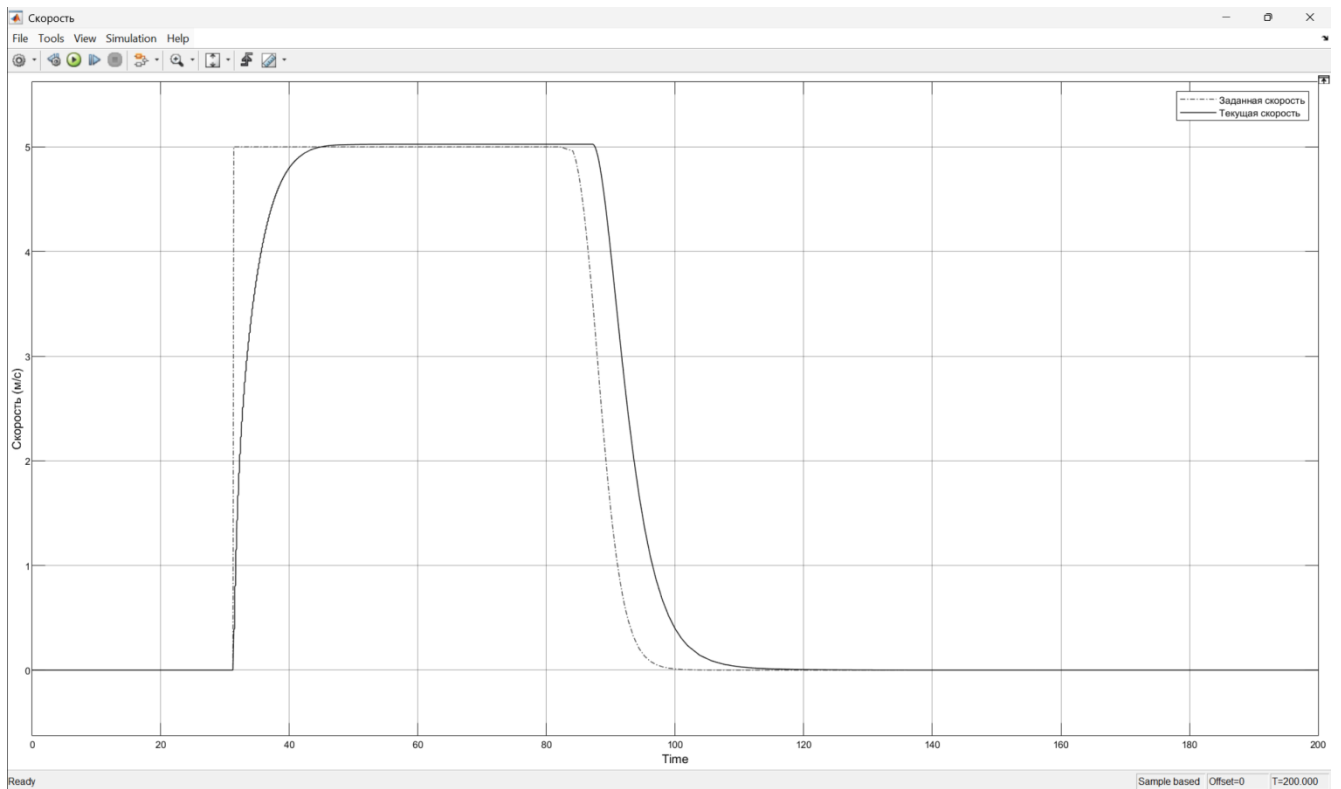


Рисунок 41 – Движения на различных глубинах. Переходный процесс по скорости (составлено автором)

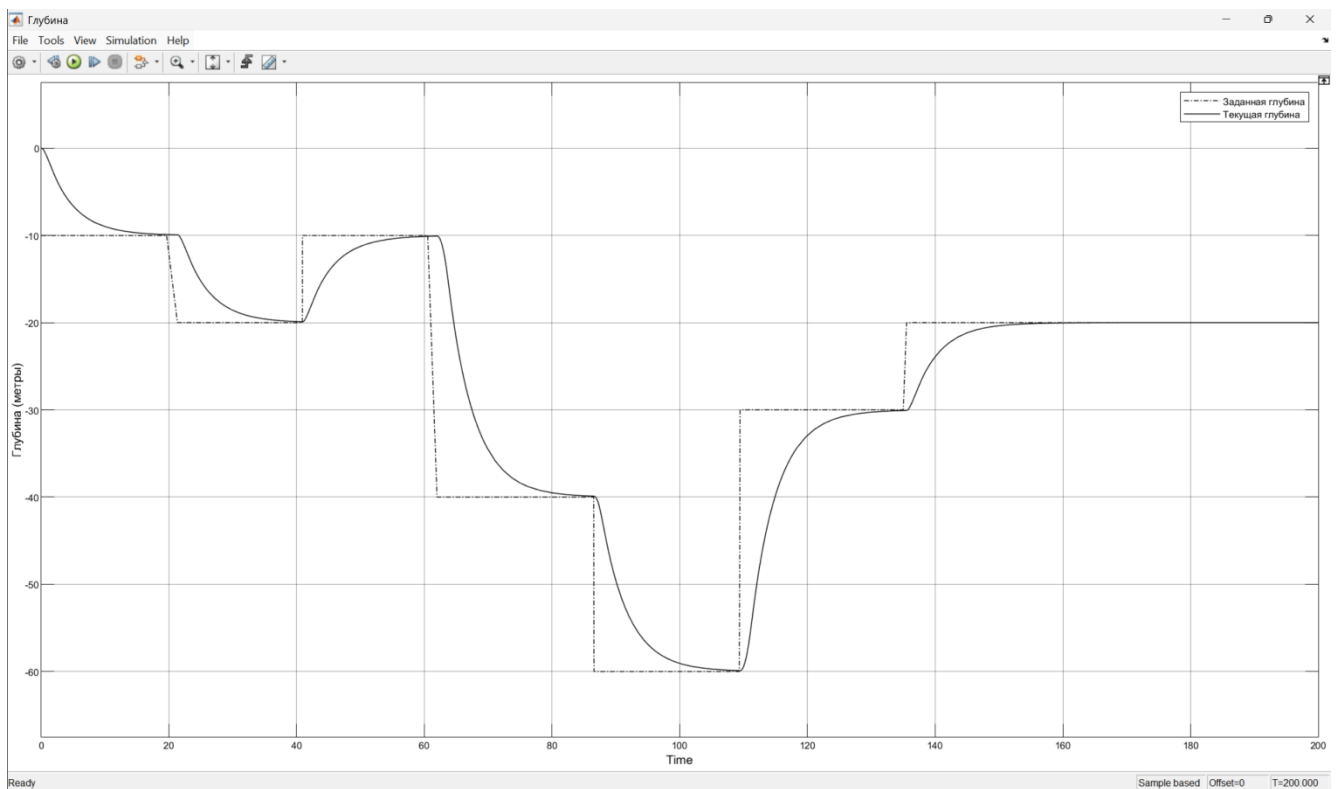


Рисунок 42 – Движения на различных глубинах. Переходный процесс по глубине (составлено автором)

Анализ графиков переходного процесса.

Глубина. Все нисходящие ступени демонстрируют апериодическую форму отклика без перерегулирования. Восходящий участок характеризуется отсутствием перерегулирования благодаря положительной остаточной плавучести и интегральной части регулятора. Во всех случаях система достигает диапазона $\pm 2\%$ от задания не более чем за 25 с, что удовлетворяет требованиям.

Скорость. На горизонтальном участке после подачи ступенчатой команды 5 м/с аппарат достигает требуемого значения за ~ 18 с; максимальное превышение 0,2 м/с (4 %). После отмены задания скорость экспоненциально затухает до 0 с постоянной времени ~ 9 с.

Курс. На всём промежутке задаётся фиксированное отклонение $-0,035$ рад ($\approx -2^\circ$). Отклик апериодический; время нарастания 12 с, перерегулирование отсутствует, установление до $\pm 0,005$ рад занимает ~ 35 с.

Сценарий демонстрирует, что глубинный контур устойчиво отрабатывает многоступенчатый профиль с амплитудами до 60 м, при этом каналы скорости и курса сохраняют требуемую точность без взаимного влияния. Эти результаты подтверждают адекватность настроек регуляторов для задач инспекции протяжённых подводных объектов с выраженным рельефом.

Выполненное моделирование подтвердило, что разработанная система управления обеспечивает требуемую точность, быстродействие и устойчивость в условиях типовых миссий АНПА. Достигнутые показатели:

- удержание глубины с точностью ± 2 см;
- устойчивое наведение по курсу в пределах $\pm 2^\circ$;
- восстановление скорости с допустимым отклонением 0,05 м/с;
- отсутствие перерегулирования, способного вызвать раскачку аппарата.

Тем самым система удовлетворяет критериям, целесообразным для картографирования и инспекции подводных инженерных сооружений.

4.5 Разработка практических рекомендаций по внедрению схемных, технических, технологических и аппаратно-программных решений информационно-управляющей системы АНПА, обеспечивающей качественное и эффективное решение задач в интересах минерально-сырьевого комплекса в морских и океанских акваториях России

На основании выполненных исследований и результатов моделирования сформулированы практические рекомендации, направленные на внедрение созданной ИУС АНПА в реальных условиях эксплуатации, в частности для задач морской добычи и мониторинга трубопроводов в акваториях России. Эти рекомендации охватывают как совершенствование технических решений, так и организационные меры по эффективному использованию АНПА. Ниже приводятся основные из них

При переходе от прототипа к промышленному образцу следует уделить повышенное внимание материалам и конструкциям, рассчитанным на длительную работу в соленой воде, при низких температурах и высоком давлении. Рекомендуется применять корпуса из коррозионностойких сплавов или композитов, а также многократные уплотнения критических узлов. Необходимо сертифицировать аппарат на герметичность по классам IP68+ и проводить периодические испытания давлением в барокамере. Учитывая, что работа предполагается в разных климатических условиях (включая арктические моря), все компоненты (электроника, батареи) должны сохранять работоспособность при температуре воды близкой к 0 °С. Практически это может потребовать установки системы подогрева внутренних отсеков (например, теплового элемента с термостатом, питаемого от батареи), чтобы датчики и аккумуляторы работали в оптимальном диапазоне температур.

Для успешного выполнения миссий по картографированию и инспекции в открытом море стоит интегрировать дополнительные навигационные средства. Рекомендуется оснастить АНПА доплеровским лагом и высокоточным гидроакустическим навигационным модулем для определения положения под водой. Это позволит аппарату ориентироваться относительно морского дна и значительно снизит дрейф, наблюдаемый при использовании только инерциальной навигации. Также стоит реализовать алгоритмы навигации типа SLAM (одновременная локализация и построение карты) с использованием сонаров, что актуально для автономного исследования неизвестных участков дна в рамках геологоразведки.

Несмотря на эффективность ПИД-регуляторов, для работы в сложных условиях минерально-сырьевого комплекса (например, при переменных течениях, вокруг подводных сооружений) рекомендуется внедрить адаптивные и робастные алгоритмы. Перспективно использование методов искусственного интеллекта для адаптации настроек регуляторов в реальном времени, а также предиктивного управления с учетом модели окружения. Например, можно реализовать режимы автоматического слежения: визуальный или акустический трекинг трубопровода, удержание фиксированной дистанции до дна при картографировании (с помощью эхолота), обход препятствий на маршруте. Реактивные методы управления могут обеспечить безопасную навигацию вблизи объектов без сложного планирования. Внедрение таких функций сделает АНПА более автономным и способным эффективно решать задачи без постоянного контроля оператора.

Для промышленных применений продолжительность миссий АНПА должна быть значительно увеличена (до нескольких десятков часов). Рекомендуется рассмотреть использование емких аккумуляторных батарей (литий-ионные с большим запасом, серебряно-цинковые для арктических условий) или даже топливных ячеек, как это применено в ряде современных. Также следует предусмотреть модульную замену батарей на судне

сопровождения либо организацию подзарядки (например, от специальной док-станции на шельфовой платформе). Это позволит регулярно использовать аппарат для мониторинга, не дожидаясь полного его разряда на миссии. Кроме того, эффективное управление энергопотреблением на программном уровне, такое как отключение неиспользуемых модулей, переход в спящий режим между активностями – поможет продлить время работы.

Максимальный эффект от внедрения АНПА достигается при его использовании в составе комплексной системы мониторинга, включающей надводные суда, беспилотные аппараты разных типов и стационарные датчики. Рекомендуется интегрировать АНПА с инфраструктурой. Оборудовать базовое судно, способное перевозить и спускать аппарат (например, небольшое специализированное судно или платформа). Такое судно-носитель может выполнять сразу несколько функций: транспортировать аппарат к месту работ, служить ретранслятором связи, обрабатывать данные с АНПА (например, строить карты в реальном времени по данным сонаров). В идеале, создать на борту судна центр управления, объединяющий данные от АНПА, гидролокаторов, спутниковых снимков и др., для всестороннего контроля подводной обстановки. Особенно актуально это при мониторинге протяженных объектов – например, трубопроводов длиной десятки километров, где можно задействовать флотилию из нескольких АНПА, работающих одновременно на разных участках и координируемых с единого центра

Для надежной работы в длительной перспективе необходимо разработать регламент обслуживания АНПА. В него следует включить: проверку и замену уплотнений перед каждой миссией, калибровку датчиков (особенно компаса и гироскопов – поскольку в высоких широтах магнитное поле может меняться, а гироскопы со временем дрейфуют), тестирование емкости аккумуляторов. Также целесообразно после каждой миссии проводить тщательный осмотр корпуса на предмет микротрещин или следов электрохимической коррозии, особенно при работе в агрессивной морской среде. Создание запасных частей (например, сменных модулей носового отсека с датчиками, которые можно быстро заменить) позволит минимизировать время простоя аппарата при ремонтах.

При реализации проекта внедрения следует оценить экономический эффект – снизятся ли издержки на мониторинг, повысится ли безопасность. Практика показывает, что использование АНПА для рутинных обследований трубопроводов может значительно сократить затраты, по сравнению с постоянным привлечением судов и водолазов. Кроме того, раннее обнаружение проблем с помощью регулярных автономных миссий способно предотвратить аварии и экологический ущерб. Таким образом, важно разработать методику расчета эффективности и донести ее до заинтересованных организаций минерально-сырьевого комплекса, стимулируя инвестиции в эту технологию. Рекомендуется на первом этапе внедрения

проводить пилотные проекты на конкретных объектах (например, обследование участка трубопровода длиной несколько километров), сравнивать результаты и затраты с традиционными методами, чтобы накопить доказательную базу выгод.

В заключение, внедрение разработанных решений информационно-управляющей системы АНПА в практику морских работ представляется вполне осуществимой задачей. Текущие тенденции в экономике показывают растущий интерес к мобильным робототехническим комплексам для автономного мониторинга океана. Грамотная реализация перечисленных рекомендаций позволит создать надежный отечественный комплекс автономного подводного мониторинга, применимый в различных сценариях – от обследования подводных трубопроводов и инфраструктуры до поиска и оценки морских минеральных ресурсов. Это повысит технологическую независимость и эффективность работ в российском минерально-сырьевом секторе, обеспечивая более частый, детальный и безопасный контроль состояния подводных объектов.

4.6 Выводы по главе 4

1) Разработана нелинейная математическая модель АНПА в шести степенях свободы с учётом динамики движителей Blue Robotics T200. Модель объединяет уравнения Ньютона–Эйлера, гидростатические и гидродинамические силы, а также передаточные функции двигателей 4-го порядка, что позволило достоверно воспроизвести колебательный характер отклика движителей.

2) Введены допущения и ограничения, обеспечившие баланс между реализмом и вычислительной сложностью: нейтральная плавучесть, делимость вертикального и горизонтального движения, умеренные внешние возмущения, локальный характер миссий.

3) Построена имитационная модель в MATLAB/Simulink. Использование базового блока 6DOF (Euler Angles) и подсистем распределения сил/моментов позволило получить удобную платформу для последующего синтеза и отладки алгоритмов управления.

4) Синтезирована многоконтурная система управления на базе ПИД-регуляторов по глубине, курсу и скорости с алгоритмом координации каналов. Настройка выполнена методами автоподбора в среде Simulink; обеспечена устойчивость при типовых манёврах.

5) Проведена оценка качества управления. Моделирование показало точность удержания глубины $\pm 0,05$ м, курса $\pm 3^\circ$, времени переходного процесса 10–20 с без перерегулирования, что удовлетворяет требованиям картографирования и инспекции трубопроводов.

6) Сформулированы практические рекомендации по промышленному внедрению:

- материалы и герметизация корпуса для условий солёной воды и низких температур;
- интеграция доплеровского лага, USB/LBL-навигации и алгоритмов SLAM;
- переход к адаптивным/робастным стратегиям управления и ИИ-модулям;

— увеличение энерговооружённости за счёт сменных батарей;

— встраивание АНПА в комплексную систему морского мониторинга и разработка регламента технического обслуживания.

Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в рецензируемой научной статье [11]

Таким образом, в главе 4 разработана и верифицирована полная информационно-управляющая система АНПА, объединяющая математическое описание объекта, методы управления и рекомендации по их технической реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена разработке научно-методических основ создания ИУС АНПА, оптимизированной для решения задач МСК России. Системный анализ отраслевых требований подтвердил потребность в высоко автономных аппаратах, способных работать в Арктике и на глубинах до 3000 м при ограниченной внешней связи.

Сформирована концептуальная модель ИУС, описывающая 48 внутренних и внешних параметров. Экспертно-статистический анализ (коэффициент конкордации 0,77) позволил количественно ранжировать их значимость. Предложен метод структурно-параметрического синтеза и сравнены три архитектуры. По критериям точности, надёжности, энергоэффективности и стоимости оптимальной признана гибридная схема на базе с децентрализованным распределением функций.

Построена нелинейная 6-мерная модель ИУС АНПА в имитационной среде MATLAB/Simulink. Синтезированные многоконтурные ПИД-регуляторы обеспечивают удержание глубины $\pm 0,05$ м, курса $\pm 3^\circ$ и переходный процесс 10–20 с без перерегулирования, что удовлетворяет требованиям геологоразведки и инспекции трубопроводов.

Выполненное диссертационное исследование позволило решить комплексную научно-практическую задачу создания основы для нового поколения отечественных АНПА, способных эффективно и автономно выполнять геологоразведочные и технологические операции в суровых условиях Мирового океана. Полученные результаты представляют собой значимый вклад в развитие подводной робототехники и открывают возможности для широкого применения роботизированных средств при освоении минерально-сырьевых ресурсов России.

Перспективами дальнейших исследований являются углубление и расширение разработанных подходов за счёт интеграции современных алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения, что позволит значительно повысить автономность и эффективность ИУС АНПА при решении задач МСК. Кроме того, необходима практическая реализация предложенных решений с последующей экспериментальной апробацией в условиях реальных арктических экспедиций. Также актуально дальнейшее совершенствование специализированной аппаратуры и методик её применения для решения более широкого спектра задач минерально-сырьевого комплекса России в экстремальных морских условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардачевский, Н. Н., Безсуднов, Е. Ю. Состояние и перспективы применения необитаемых подводных аппаратов в области гидрографических исследований и подводной навигации // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2013. – № 2 (5). – С. 124–128.
2. Бахарев, С. А., Казаков В. Б. Подводно-подлёдный поиск месторождений углеводородов в северных и арктических акваториях // Вестник РАЕН. – 2017. – № 2 (17). – С. 47–55.
3. Боженков, Ю. А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – № 1 (4). – С. 47–68.
4. Войтов, Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. / Д.В. Войтов – Санкт-Петербург: Моркнига, 2012. – 504 с.
5. Войтов, Д. В. Автономные необитаемые подводные аппараты. / Д.В. Войтов – Санкт-Петербург: Моркнига, 2015. – 330 с.
6. Воронцов, А. В. [и др.]. Ожидаемые направления развития энергетических установок гражданских судов и морских сооружений // Труды Центрального научно-исследовательского института им. акад. А. Н. Крылова. – 2009. – № 45. – С. 5–16.
7. Гагиева, Л. Р., Ковалев С. И., Алеников Д. И. Проблемы создания уникальных буровых платформ России для работы на шельфе (на примере «Беркут», проектов «Сахалин-1», «Сахалин-2») // Актуальные проблемы наук о Земле. – 2022. – С. 206–211.
8. Гальперин, А. М. [и др.]. Оценка возможности вовлечения железомарганцевых месторождений морского дна в разработку. II. Перспективы разработки глубоководных месторождений твёрдого минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 6. – С. 361–368.
9. Занин, В. Ю., Маевский А. М. Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий – М. : Министерство энергетики Российской Федерации, ООО «Технодевелоп», 2019. – С. 13–22.
10. Зуев, А. В. [и др.]. Некоторые вопросы создания морских экспериментальных платформ необитаемых подводных аппаратов // Материалы конференции «Роботизация Вооружённых Сил Российской Федерации» – 2020. – С. 299–303.
11. Новожилов, И.М. Разработка и прототипирование распределённой системы управления геологоразведывательным необитаемым подводным аппаратом / И.М. Новожилов,

М.Ю. Шестопапов, **Д.Д. Котов**, Т.В. Кухарова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2022. – № 4. – С. 17–28. DOI: 10.32603/2071-8985-2022-15-4-17-28.

12. Красильников, А. В. Проблемы создания средств освоения континентального шельфа Мирового океана // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2010. – № 8 (53). – С. 47–50.

13. Кузнецов, Г. П. Комплекс для разработки подводных месторождений полезных ископаемых: пат. RU 2349489 С2 Российская Федерация / заявитель и патентообладатель Кузнецов Г. П. – № 2007113797/11; заявл. 20.06.2006; опубл. 20.03.2009. – Бюл. № 8.

14. 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

15. Маевский, А. М., Занин В. Ю., Кожемякин И. В. Разработка комбинированной системы управления резидентным/интервенционным АНПА на основании поведенческих методов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 119–133.

16. Мержо, М. Ш., Китиева М. И. Состояние рынка подводной робототехники // Управленческий учёт. – 2022. – № 7. – С. 84–89.

17. Меткин, Д. М., Медведева Л. В., Назаров В. И. Проблемы развития технической базы российской нефтегазовой геофизики // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. – 2020. – № 2. – С. 39–48.

18. Государственная программа Российской Федерации «Воспроизводство и использование природных ресурсов». – М.: Правительство РФ, 2014.

19. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 22.12.2018 г. № 2914-р. – М.: Правительство РФ, 2018.

20. Никитин, Б. А. [и др.]. Анализ влияния геологической неопределённости на разработку Киринского месторождения // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2017. – № 5. – С. 52–56.

21. Панов, Р. С. О результатах и проблемах развития минерально-сырьевой базы России по итогам работ АО «Росгеология» в 2018 г. // Минеральные ресурсы России: экономика и управление. – 2019. – № 1. – С. 4.

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

23. Рыбалко, А. Е. [и др.]. Особенности строения четвертичного покрова Северо-Карского шельфа (по материалам ТТН-21) // ГеоЕвразия-2024. Геологоразведочные технологии:

наука и бизнес.: Труды VII Международной геолого-геофизической конференции – 2024. – № 12. – С. 67–72.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024616877 Российская Федерация. Программа для мониторинга параметров автономного необитаемого подводного аппарата. Заявка №2024614882: заявл. 12.03.2024: опубл. 26.03.2024 / **Д.Д. Котов**, Д.А. Первухин; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 1 с.

25. Сирота, С. А. Обзор экологического законодательства в области добычи полезных ископаемых на шельфе европейских морей на примере Великобритании // Актуальные проблемы обеспечения экологической безопасности в Российской – 2017. – С. 70-77.

26. Фирсов, Ю. Г. Специальное навигационное обеспечение и точность батиметрической съёмки для глубоководных геологоразведочных работ // Вестник ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. – 2019. – № 6 (11). – С. 1070–1087.

27. Шамсуллин, Р. М. [и др.]. МЛСП «Приразломная»: опыт освоения арктического шельфа России // Газовая промышленность. – 2015. – № 11. – С. 96–99.

28. Щербатюк, А. Ф. Об использовании необитаемых подводных аппаратов при освоении месторождений глубоководных минералов // Подводные исследования и робототехника. – 2023. – № 2. – С. 44.

29. Юбко, В. М., Пономарёва И. Н., Лыгина Т. И. Современные тенденции развития техники и технологий разведки и добычи железомарганцевых конкреций и кобальтоносных железомарганцевых корок Мирового океана // Океанологические исследования. – 2023. – № 4 (51). – С. 186–215.

30. Aguirre, F. et al. State of the Art of Parameters for Mechanical Design of an Autonomous Underwater Vehicle // International Journal of Oceans and Oceanography. – 2017. – № 1 (11). – 3. 89-103.

31. Alam, K.; Ray T.; Anavatti S. G. Design and construction of an autonomous underwater vehicle // Neurocomputing. – 2014. – № 142. – P. 16–29.

32. Binney, J.; Krause A.; Sukhatme G. S. Informative path planning for an autonomous underwater vehicle // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2010. – P. 4791–4796.

33. Che, G.; Yu Z. Neural-network estimators based fault-tolerant tracking control for AUV via ADP with rudder faults and ocean current disturbance // Neurocomputing. – 2020. – №. 411. – P. 442–454.

34. Dinc, M.; Hajiyeve C. Integration of navigation systems for autonomous underwater vehicles // *Journal of Marine Engineering & Technology*. – 2015. – Vol. 14, No. 1. – P. 32–43.
35. Dy, Liacco T. The Adaptive Reliability Control System // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1967. – Vol. PAS-86, No. 5. – P. 517–531.
36. Eichhorn, M. et al. Modular AUV system with integrated real-time water-quality analysis // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, No. 6. – P. 1837.
37. Fujii, T.; Ura T. Development of motion control system for AUV using neural nets // *Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*. – 1990. – P. 81–86.
38. 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.
39. González-García, J. et al. Autonomous underwater vehicles: localization, navigation, and communication for collaborative missions // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 4. – P. 1256.
40. Gould-Davies, N. Russia, the West and sanctions // *Routledge* – 2023. – P. 7–28.
41. Guerrero, J. et al. Trajectory tracking for autonomous underwater vehicle: an adaptive approach // *Ocean Engineering*. – 2019. – Vol. 172. – P. 511–522.
42. Hu, F. et al. Conceptual design of a long-range autonomous underwater vehicle based on multidisciplinary optimization framework // *Ocean Engineering*. – 2022. – Vol. 248. – Art. 110684.
43. Hwang, J. et al. Acoustic search and detection of oil plumes using an autonomous underwater vehicle // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 8, No. 8. – P. 618.
44. Hwang, J.; Bose N.; Fan S. AUV adaptive sampling methods: a review // *Applied Sciences*. – 2019. – Vol. 9, No. 15. – P. 3145.
45. Ivanov, A. Yu. et al. Oil spills in the Barents Sea: results of multiyear monitoring with synthetic aperture radar // *Marine Pollution Bulletin*. – 2022. – Vol. 179. – Art. 113677.
46. Jiang, C.; Wan L.; Sun Y. Design of motion control system of pipeline-detection AUV // *Journal of Central South University*. – 2017. – Vol. 24, No. 3. – P. 637–646.
47. Kao, M. et al. A simple approach to planning and executing complex AUV missions // *Proceedings of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology* – 2006. – P. 95–102.
48. Kim, Y. J. et al. Development of a power-control system for AUVs probing for underwater mineral resources // *Journal of Marine Science and Application*. – 2009. – Vol. 8, No. 4. – P. 259–266.
49. Kirichenko, Yu. V.; Kashirsky A. S. Geoecological aspects of the sustainable use of ocean deposits of solid minerals // *Ecology and Industry of Russia*. – 2016. – Vol. 20, No. 7. – P. 36–41.
50. **Kotov, D.D.** Prospects for the Use of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) to Solve the Problems of the Mineral Resources Complex (MRC) of the Russian Federation / D.D. Kotov,

D.A. Pervukhin, H. Davardoost, O.V. Afanaseva // *Journal of Maritime Research*. - 2024. – Vol. 21, № 1. – PP. 309-317.

51. Kukulya, A. L. et al. Development of a propeller-driven long-range range autonomous underwater vehicle (LRAUV) for under-ice mapping of oil spills and environmental hazards // *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles* – 2016. – P. 95–100.

52. Kussat, N. H.; Chadwell C. D.; Zimmerman R. Absolute positioning of an Autonomous Underwater Vehicle using GPS and acoustic measurements // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. – 2005. – Vol. 30, No. 1. – P. 153–164.

53. Lapierre, L. Robust diving control of an AUV // *Ocean Engineering*. – 2009. – Vol. 36, No. 1. – P. 92–104.

54. Leonard, J. J.; Bahr A. *Autonomous underwater vehicle navigation*. – Springer, 2016. – P. 341–358.

55. Mangel, M. Optimal Search for and Mining of Underwater Mineral Resources // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. – 1983. – Vol. 43, No. 1. – P. 99–106.

56. Melnikov, V. P. et al. Past and future of permafrost monitoring: stability of Russian energetic infrastructure // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 9. – P. 3190.

57. Mendez, A.; Leo T.; Herreros M. Current state of technology of fuel cell power systems for Autonomous Underwater Vehicles // *Energies*. – 2014. – Vol. 7, No. 7. – P. 4676–4693.

58. Motta, D. et al. Challenges for deepwater operations: an industry perspective // *AI Technology for Underwater Robots*. Cham: Springer International Publishing. – 2019. – P. 37–48.

59. Paull, L. et al. AUV navigation and localization: a review // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. – 2013. – Vol. 39, No. 1. – P. 131–149.

60. Pervukhin, D.A. Development of a Conceptual Model for the Information and Control System of an Autonomous Underwater Vehicle for Solving Problems in the Mineral and Raw Materials Complex / D.A. Pervukhin, **D.D. Kotov**, V. Trushnikov // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, № 23. – P. 5916. DOI: 10.3390/en17235916.

61. Richardson, K. A perspective of marine mining within De Beers // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2007. – Vol. 107, No. 6. – P. 393–402.

62. Ridao, P. et al. On AUV control architecture // *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. – 2000. – P. 855–860.

63. Sanchez, P. J. B., Papaalias M., Marquez F. P. G. Autonomous underwater vehicles: Instrumentation and measurements // *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. — 2020. – № 2 (23). – C. 105–114.

64. Sans-Muntadas, A. et al. Learning an AUV docking maneuver with a convolutional neural network // *IFAC Journal of Systems and Control*. – 2019. – Vol. 8. – P. 100049.

65. Shakirov, R. B. et al. Results of scientific expeditionary geological and geophysical studies of mineral resources in Far-Eastern seas of the Russian Federation and the Pacific Ocean (GEOMIR project) // *Journal of Oceanological Research*. – 2024. – Vol. 52, No. 2. – P. 72–106.
66. Wakita, N. et al. Development of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) for Exploring Deep Sea Marine Mineral Resources // *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. – 2010. – Vol. 47, No. 3. – P. 73–80.
67. Wang, J. et al. Sliding mode based neural adaptive formation control of underactuated AUVs with leader-follower strategy // *Applied Ocean Research*. – 2020. – Vol. 94. – P. 101971.
68. Yang, Y.; Xiao Y.; Li T. A Survey of Autonomous Underwater Vehicle Formation: Performance, Formation Control, and Communication Capability // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2021. – Vol. 23, No. 2. – P. 815–841.
69. Yoon, S.; Qiao C. Cooperative search and survey using autonomous underwater vehicles (AUVs) // *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. – 2010. – Vol. 22, No. 3. – P. 364–379.
70. Yoshida, H. et al. An autonomous underwater vehicle with a canard rudder for underwater minerals exploration // *International Conference on Mechatronics and Automation* – 2013. – P. 1571–1576.
71. Zhang, Q. et al. Deep interactive reinforcement learning for path following of Autonomous Underwater Vehicle // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 24258–24268.
72. Zong, G.; Sun H.; Nguang S. K. Decentralized adaptive neuro-output feedback saturated control for INS and its application to AUV // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – 2021. – Vol. 32, No. 12. – P. 5492–5501.
73. HUGIN AUV Chosen by Leading Survey Providers // *Hydro International* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.hydro-international.com/content/news/hugin-auv-chosen-by-leading-survey-providers> (дата обращения: 29.01.2025).
74. LUKOIL Presents Its Environmental Expertise with Respect to Baltic Fields Development [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lukoil.com/PressCenter/Pressreleases/Pressrelease/lukoil-presents-its-environmental-expertise-with-r> (дата обращения: 29.01.2025).
75. Sarma and Under-Ice Operations // *Strikepod* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.strikepod.com/sarma-and-under-ice-ops/> (дата обращения: 29.01.2025).
76. Vityaz-D Deep-Sea Autonomous Underwater Vehicle // *Naval-Technology* [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.naval-technology.com/projects/vityaz-d/> (дата обращения: 29.01.2025).

77. Russia's USC Wants to Explore for Oil under Arctic Ice Using Robots // Maritime-Executive [Электронный ресурс]. – URL: <https://maritime-executive.com/article/russia-s-usc-wants-to-explore-for-oil-under-arctic-ice-using-robots> (дата обращения: 29.01.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2024616877

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМНомер регистрации (свидетельства):
2024616877

Дата регистрации: 26.03.2024

Номер и дата поступления заявки:
2024614882 12.03.2024Дата публикации и номер бюллетеня:
26.03.2024 Бюл. № 4

Автор(ы):

Котов Дмитрий Дмитриевич (RU),

Первухин Дмитрий Анатольевич (RU)

Правообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II» (RU)

Название программы для ЭВМ:

Программа для мониторинга параметров автономного необитаемого подводного аппарата

Реферат:

Программа предназначена для обработки, журналирования и отображения информации о состоянии автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Для решения поставленной задачи мониторинга параметров АНПА использованы следующие алгоритмы: алгоритм системы мониторинга параметров АНПА; алгоритм обмена данными между АНПА и системой мониторинга; алгоритм графического отображения положения АНПА в пространстве. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: обработка данных, полученных от АНПА, и их валидация; запись и хранение данных, полученных от АНПА; графическое отображение текущего положения и состояния АНПА. Программа может быть использована при проведении практических работ для студентов специальности 27.03.04 «Управление в технических системах».

Язык программирования:

C++

Объем программы для ЭВМ:

149 КБ

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ
Начальник Михайловской военной
артиллерийской академии
генерал-лейтенант
«16» 01 2025 г. С. Баканеев
М.П.

АКТ

реализации результатов диссертационных исследований
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Котова Дмитрия Дмитриевича

«16» 01 2025 г.

г. Санкт-Петербург

Комиссия в составе: председателя – временно исполняющего обязанности начальника НИЦ (РВиА) к.в.н., доцента, полковника Дудника М.В., членов комиссии: начальника 3 НИО НИЦ (РВиА) к.т.н. подполковника Спивака И.А., старшего научного сотрудника 3 НИО НИЦ (РВиА) к.т.н. Каламитцева А.О., составила настоящий акт о том, что результаты диссертационных исследований Котова Дмитрия Дмитриевича на тему «Методы анализа и синтеза информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата для решения задач в интересах минерально-сырьевого комплекса» реализованы при выполнении составной части научно-исследовательской работы Обоснование направлений развития и способов возможного применения комплексов (средств) противодействия робототехническим комплексам, разрабатываемых в интересах видов и родов Вооруженных Сил Российской Федерации (шифр «Кибертрон»), а именно:

Результаты исследований	Где реализованы и внедрены
Концептуальная модель функционирования информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата	При разработке предложений в ТТТ к перспективным образцам комплексов (средств) противодействия РТК, для их применения в интересах ВС РФ
Метод структурно-параметрического синтеза информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата	

Применение указанных результатов диссертационного исследования позволяет повысить качество проектирования информационно-управляющей системы автономного необитаемого подводного аппарата.

Вывод: результаты научной работы Котова Дмитрия Дмитриевича считать реализованными при выполнении СЧ НИР «К»:

Заключительный отчет, этап 2. – СПб.: МВАА, 2024. – 36 с., инв. № 939дсп.

Председатель комиссии:

к.в.н., доцент, полковник

(воинское звание, подпись, фамилия)

М. Дудник

Члены комиссии:

к.т.н., подполковник

(воинское звание, подпись, фамилия)

И.Спивак

к.т.н.

(воинское звание, подпись, фамилия)

А.Каламитцев

«16» 01 2025 г.