

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МОРСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Туфанов Игорь Евгеньевич

**МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОБЗОРНО-ПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУПП  
АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
чл.-корр. РАН, д.т.н. А.Ф. Щербатюк



Владивосток – 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	2
Список условных сокращений.....	4
Введение.....	5
Глава 1. Современные методы, алгоритмы и модели управления группами АНПА .....	15
1.1. Методы решения прикладных задач с использованием одиночных АНПА и их групп.....	15
1.2. Существующие модели и алгоритмы для управления группами мобильных роботов .....	21
1.3. СПУ, обеспечивающие групповую работу АНПА.....	27
1.4. Выводы.....	29
Глава 2. Централизованное планирование миссии в группе АНПА .....	32
2.1. Постановка задачи планирования .....	32
2.2. Алгоритмы составления оптимального плана .....	37
2.2.1. Модификация алгоритма Хельда-Карпа.....	38
2.2.2. Эвристический алгоритм на основе аукционного метода .....	42
2.3. Дополнительные факторы модели .....	44
2.4. Выводы.....	45
Глава 3. Метод измерения параметра водной среды с заданной точностью, использующий группу АНПА.....	47
3.1. Формирование траектории обследования .....	47
3.2. Критерии смены шага меандра.....	51
3.3. Результаты моделирования .....	54
3.4. Обеспечение групповой работы .....	59
3.5. Выводы.....	64
Глава 4. Метод поиска и обследования локальных неоднородностей морской среды, использующий группу АНПА .....	66
4.1. Метод обследования локальных неоднородностей.....	66
4.2. Результаты моделирования .....	72

4.3. Групповая работа .....	77
4.4. Выводы.....	80
Глава 5. комплекс программ и реализация системы централизованного управления на АНПА «МАРК» .....	82
5.1. Комплекс программ для имитационного моделирования работы группы АНПА.....	82
5.1.1. Структура комплекса.....	83
5.1.2. Модель среды .....	84
5.2. Реализация централизованного управления в составе СПУ АНПА «МАРК».....	89
5.2.1. Состав и архитектура СПУ .....	89
5.2.2 Средства обеспечения групповой работы в СПУ.....	93
5.3. Испытания СПУ в составе АНПА «МАРК» .....	97
5.3.1. Миссия «меандр» .....	98
5.3.2. Миссия «квадрат» .....	101
5.3.3. Миссия «зигзаг».....	103
5.4. Выводы.....	105
Основные результаты работы .....	107
Список литературы .....	108

## СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат

АНВА – автономный необитаемый водный аппарат

ГБО – гидролокатор бокового обзора

ДФУ – Дальневосточный федеральный университет

ИПМТ ДВО РАН – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

ЛВС – локальная вычислительная сеть

ЛН – локальная неоднородность

МАРК – морской автономный робототехнический комплекс

СПУ – система программного управления

MRTA – Multi-Robot Task Allocation

MTSP – Multiple Travelling Salesmen Problem

TSP – Travelling Salesman Problem

## ВВЕДЕНИЕ

Автономные необитаемые подводные аппараты /АНПА/ – один из инструментов для исследования Мирового океана. Автономность аппарата означает, что он может решать поставленные задачи без участия человека. История АНПА начинается с 60-х годов с создания аппарата SPURV [40].

На основе использования АНПА существуют методы решения различных прикладных задач экологического мониторинга [9, 34, 37, 53], обследования протяжённых объектов [48], поиска затонувших объектов [89] и др. [1, 95]. Одним из основных классов задач, решаемых с использованием АНПА, являются обзорно-поисковые задачи. Они заключаются в покрытии некоторой площади под водой либо с целью поиска и обследования заданных объектов (локальных неоднородностей среды, шлейфов, протяжённых донных сооружений и одиночных объектов), либо для построения карты с нанесёнными результатами измерений. Традиционный метод решения обзорно-поисковых задач с использованием АНПА заключается в покрытии указанной области сетью параллельных галсов. При этом миссия для аппарата представляет собой фиксированную траекторию, вводимую в систему программного управления /СПУ/ аппарата перед погружением.

В течение последнего десятилетия различными организациями прилагаются усилия по разработке более эффективных и надёжных методов решения обзорно-поисковых задач. Для этого предлагаются и исследуются методы, использующие группы АНПА и адаптивное формирование траекторий движения аппаратов.

Большая работа в этом направлении проделана зарубежными организациями, в их числе: Массачусетский технологический институт, в котором создана и поддерживается MOOS-IvP – открытая групповая система управления мобильными объектами; Технологический институт Джорджии, в котором ведутся исследования групповой работы АНПА на базе системы ROS; университет Порто, в котором разработана СПУ DUNE; национальный университет Сингапура и многие другие. Работы в данной области нередко объединяются в научные проекты, такие как европейский проект TRIDENT [96].

В России исследования по созданию более эффективных и надёжных методов решения обзорно-поисковых задач применительно к подводным аппаратам ведутся в ИПМТ ДВО РАН и других организациях. В области группового управления мобильными роботами и сложными распределёнными системами большой вклад принадлежит научным школам ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ЦНИИ РТК, МГТУ МИРЭА, НИИ МВС ЮФУ им. А. В. Каляева и др.

Результаты практического использования нескольких АНПА одновременно приводятся в докладе [89], посвященном поискам обломков самолёта рейса Air France 447, разбившегося в 2009 году в Атлантическом океане. Зона поисков представляла собой круг радиусом порядка 70 км. Глубина в зоне поиска варьировалась от 700 до 4000 м. Операция была произведена с помощью трёх АНПА марки Remus-6000, оснащённых гидролокаторами бокового обзора /ГБО/ и работавших одновременно. Авторы отмечают высокую производительность работы трёх АНПА и сравнивают её с производительностью буксируемой системы ГБО меньшей частоты. Отмечается качество данных, полученных с помощью АНПА, гибкость в формировании траектории. Вместе с тем, приведены данные, согласно которым из 129 пусков аппаратов, совершённых во время поисковых работ, 87 (т.е. 67%) были успешными. Остальные запуски заканчивались неудачно из-за отказов оборудования и программного обеспечения. Управление каждым аппаратом было организовано независимо от других. Данные ГБО изучались вручную в режиме постобработки.

Пример использования двух разнородных АНПА описан в докладе [108]. Один из аппаратов использовался для съёмки батиметрической карты с использованием многолучевого сонара, а другой – для составления фотографической мозаики дна. При этом аппарат, оснащённый фотокамерой, привлекался для съёмки участков дна, которые были выбраны в результате постобработки данных, отснятых первым аппаратом. Ввод задания в АНПА осуществлялся вручную. В работе [87] докладывается о подготовке эксперимента

с одновременным использованием летательного, поверхностных и подводных автономных аппаратов.

Имеются примеры успешного использования АНПА и для экологического мониторинга. В докладе [101] изложены прикладные результаты, полученные и использованием АНПА Dorado в заливе Monterey на западном побережье США. К примеру, с помощью повторного построения батиметрической карты одного и того же района в два различных момента времени, было зафиксировано изменение батиметрии вплоть до 15 м. вследствие извержения подводного вулкана. АНПА данного класса используются также для изучения слоя фитопланктона и взятия проб воды в местах его наибольшей концентрации.

Работы [47, 78] посвящены опыту практического применения АНПА Hugin. Сравнивается экономическая эффективность использования данного АНПА по сравнению с буксируемыми системами. Делается вывод, что использование АНПА обходится в 2–3 раза дешевле. Данный аппарат использовался в работах для гидрографического обследования с целью прокладки донных труб, начиная с 1997 года. Известны его применения для построения карты рельефа на акватории размером  $26 \times 17$  км. при рабочей глубине 1500 м. Максимальная глубина работы данного АНПА – 3000 м.

Для сбора океанографических данных на больших акваториях используют глайдеры – особый вид АНПА [106]. В работе [65] приводятся результаты экспериментов с группой глайдеров в заливе Монтерей на западном побережье США. Используемые в экспедиции глайдеры не имели гидроакустических средств связи. Они поднимаются на поверхность раз в два часа для сеанса связи. Осуществляется централизованное управление группой глайдеров: каждый из них получает путевую точку на очередном сеансе связи от управляющего узла через спутник связи. На другом побережье США, в Мексиканском заливе, действует группировка глайдеров, которая собирает океанографические данные в рамках организации GCOOS (Gulf of Mexico Coastal Ocean Observing System) [83, 84]. Приложения по использованию этих данных включают исследование

вредоносного цветения водорослей, гипоксии и последствий аварии на нефтяной платформе Deep Water Horizon в 2010 году.

Глайдеры представляют собой разновидность энергоэффективных АНПА. Передвижение аппарата такого класса осуществляется за счёт изменения плавучести. Другим по сравнению с используемым глайдерами способом увеличения времени работы АНПА является использование солнечных батарей. Данный подход был применён в аппарате SAUV, разработанном совместно ИПМТ ДВО РАН и институтом AUSI из США. Существует также его обновлённая модификация SAUV II. Аппараты данного класса были использованы для измерения концентрации кислорода в Гринвичском заливе [55]. Отмечается, что использование АНПА позволило увеличить качество получаемых данных о концентрации растворённого кислорода.

Среди результатов, связанных с интеллектуализацией автономных аппаратов, можно отметить работы по обследованию локальных неоднородностей морской среды в виде шлейфа. Так, в работе [44] рассматривается задача локализации шлейфа тёплой воды, сбрасываемой АЭС Калверт Клифс в Чесапикский залив. Алгоритм формирования траектории позволил без детального обследования всего залива отследить шлейф тёплой воды с использованием АНПА. Для отслеживания шлейфа применялась т.н. индикаторная функция, которая является линейной комбинацией нескольких параметров среды, включающих температуру и электропроводность морской воды.

В докладе [64] представлены результаты работы АНПА по поиску источника химического шлейфа, который искусственно создавался с использованием родаминового красителя. Одиночный аппарат марки REMUS запускался несколько раз, осуществляя поиск источника загрязнения в квадрате размером  $300 \times 100$  м. Был использован алгоритм, в котором АНПА, обнаружив шлейф, начинает движение против течения с поправкой в случае потери шлейфа. Серией запусков была продемонстрирована работоспособность предложенного алгоритма.



Существуют также методы групповой работы АНПА для поиска центра ЛН. Например, в докладе [97] приводятся результаты морских испытаний алгоритма коллективного поиска центра ЛН. Аппараты, описанные в работе, принадлежат классу микро-АНПА (весом 4,5 кг) и не имеют развитых средств связи и навигации. По этой причине каждый аппарат был запрограммирован на периодическое всплытие для уточнения своих координат с помощью спутниковой навигационной системы и получения данных от других аппаратов. Обмен данными происходил через судовой пост оператора. Использовалось искусственное поле ЛН, для которого значение обратно пропорционально квадрату расстояния до источника. Цель запусков состояла в том, чтобы все АНПА группы прибыли к источнику неоднородности. Доклад сообщает об успехе испытаний. Отмечается, что не все аппараты во всех тестах успешно смогли заглубиться для выхода в центр ЛН, тем не менее, в каждом тесте хотя бы один аппарат выполнял миссию.

На сегодняшний день в научном сообществе происходит накопление базы методов, которые позволят более эффективно использовать АНПА для решения обзорно-поисковых задач за счёт интеллектуализации отдельных аппаратов. Кроме того, постоянно предлагаются новые методы для решения задач данного типа на основе групповой работы АНПА. Многие из этих методов реализуются для конкретных СПУ, часть из которых в течение последних десяти лет стала доступной с открытым исходным кодом, что приводит к их более широкому распространению.

Многие из существующих решений обзорно-поисковых задач, основанных на использовании группы АНПА, либо не рассматривают составление оптимального плана работ, либо рассматривают лишь точечные задания, выполнение которых заключается в их «посещении». Однако, в задаче поиска локальных неоднородностей /ЛН/ водной среды, задания уже не являются точечными и необходимо усовершенствование существующих подходов. В ряде работ развиваются методы съёмки параметра водной среды, использующие данные предыдущих измерений для вычисления места, где необходимо

выполнить следующее измерение. При этом зачастую не учитывается и не оптимизируется путь, пройденный каждым аппаратом к новой точке измерения, либо требуется синхронизация между АНПА на каждом шаге работы алгоритма. Возникают вопросы к надёжности и эффективности подобных решений в сравнении с традиционными методами.

В связи с перечисленными недостатками существующих методов, проблема разработки методов решения обзорно-поисковых задач с использованием групп АНПА является важной и актуальной.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование методов, моделей и алгоритмов для решения обзорно-поисковых задач на основе применения групп автономных необитаемых подводных аппаратов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе ставились и решались следующие **задачи**:

1. Разработка и исследование математической модели организации работы в группе АНПА.
2. Разработка и исследование метода измерения параметров водной среды с заданной точностью на основе использования группы АНПА.
3. Разработка и исследование метода поиска и обследования локальных неоднородностей водной среды на основе использования группы АНПА.
4. Реализация методов и алгоритмов решения обзорно-поисковых задач в виде комплекса программ, предназначенного для проведения вычислительного эксперимента, а также для установки и испытания на борту АНПА.

**Методы исследования.** В работе использовались элементы теории графов, методы математической статистики, вычислительной математики, математического моделирования, исследования операций, а так же методы объектно-ориентированного программирования.

**Научная новизна.**

1. Предложена математическая модель задачи планирования работы в группе АНПА. В рамках предложенной модели разработаны модификации методов

решения задачи о группе коммивояжеров на основе алгоритма Хельда-Карпа и аукционного метода.

2. Разработан новый метод измерения параметров водной среды с требуемой точностью на основе использования группы АНПА, в котором траектории движения АНПА представляют собой меандр с переменным шагом, в зависимости от степени изменчивости измеренных данных. Разработанный подход позволяет покрывать заданную область без пропусков. Предложен набор неделимых элементарных заданий, которые распределяются между АНПА таким образом, чтобы минимизировать время выполнения всей миссии в целом. В методе реализована процедура перепланирования заданий в случае изменения числа работающих АНПА, что обеспечивает оптимальность планирования для группы с переменным числом аппаратов.
3. Разработан новый метод поиска и обследования локальных неоднородностей водной среды с использованием группы АНПА. Предложен набор неделимых элементарных заданий, включающий горизонтальное и вертикальное оконтуривание ЛН, а также проход через неоднородность с целью измерения концентрации растворенного вещества. Элементарные задания распределяются между АНПА таким образом, чтобы минимизировать время обследования указанной области. Метод впервые позволяет не только выявить количество ЛН и их местоположение, но также оценить их объем и количество растворенного в них вещества.

#### **Практическая значимость и реализация результатов работы.**

Разработанные и исследованные в диссертационной работе алгоритмы и методы позволяют повысить эффективность использования АНПА при решении обзорно-поисковых задач и могут быть востребованы в других областях мобильной робототехники.

Способ представления заданий на основе математической модели задачи планирования в группе АНПА, а также входящие в состав комплекса программ алгоритмы решения задачи оптимального планирования в группе АНПА, используются в составе системы программного управления АНПА и АНВА

«МАРК», которые были разработаны в научно-образовательном центре «Подводная робототехника», созданном на базе ИПМТ ДВО РАН и ДВФУ, подтверждено актом внедрения. Разработанный комплекс программ используется в Дальневосточном федеральном университете для моделирования групповой работы АНПА при исследовании методов решения обзорно-поисковых задач, подтверждено актом внедрения.

Представленные в диссертационной работе исследования выполнены в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (государственный контракт № 02.740.11.0166 на выполнение в период 2009-2011 гг. научно-исследовательской работы по теме «Разработка многофункционального малогабаритного необитаемого подводного аппарата»), гранта РФФИ № 10 08 00249 на период 2010-2012 гг. на тему «Разработка комплексов интеллектуальных подводных роботов для долговременного сбора данных в океане», гранта РФФИ №13–08–00967а по проекту: «Разработка интеллектуального необитаемого водного аппарата, предназначенного для поддержки работы необитаемых подводных аппаратов при решении широкого круга задач освоения Мирового океана», а также гранта ДВО РАН №12-III-B-01И-007 на тему «Разработка и исследование адаптивных и групповых алгоритмов работы автономных необитаемых подводных аппаратов для решения задач обследования морской среды», выполненного в 2012 г.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель задачи планирования в группе АНПА.
2. Алгоритмы решения задачи планирования в группе АНПА на основе алгоритма Хельда-Карпа и аукционного метода.
3. Метод измерения параметров водной среды с требуемой точностью на основе использования группы АНПА.
4. Метод поиска и обследования локальных неоднородностей водной среды, использующий группу АНПА.

5. Комплекс программ, реализующий методы и алгоритмы решения обзорно-поисковых задач, предназначенный для проведения вычислительного эксперимента, а также для установки и испытания на борту АНПА.

**Обоснованность и достоверность результатов** работы обеспечиваются корректным применением используемых методов исследования, результатами численного моделирования. Результаты исследования соответствуют основным общепринятым теоретическим и практическим положениям.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались на всероссийской конференции «Управление в распределённых, сетевых и мультиагентных системах» (Геленджик, 2011); на всероссийской конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана» (Владивосток, 2011); на международной конференции «Современные методы и средства океанологических исследований» (Москва, 2011); на международной конференции «Underwater Intervention» (New Orleans, USA, 2011); на международной конференции «ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium» (Владивосток, 2012); на международной конференции «OCEANS» (Yeosu, Korea, 2012); на международной конференции «International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology» (Portsmouth, USA, 2013).

**Публикации результатов работы.** По материалам диссертации опубликовано 12 работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК.

**Личный вклад автора.** Все результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно.

В работах [29, 30, 103] автором разработан алгоритм предварительной оценки формы локальных неоднородностей, алгоритм вычисления параметров локальных неоднородностей, метод организации работы группы АНПА, вычислительный эксперимент.

В работах [28, 102] автором разработан статистический критерий перехода между режимами траектории, метод организации работы группы АНПА, вычислительный эксперимент.

В работах [6, 7, 8, 58, 104] автором разработаны механизмы системы программного управления АНПА, обеспечивающие их групповую работу, реализована часть других модулей системы программного управления.

В работе [24] автором разработаны и реализованы механизмы моделирования, позволяющие использовать модули СПУ АНПА совместно с имитационно-моделирующим комплексом.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 112 наименований. Основное содержание работы изложено на 120 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков и 5 таблиц.

# **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППАМИ АНПА**

В настоящей главе рассмотрены существующие интеллектуальные методы решения прикладных задач на основе использования АНПА. Под интеллектуальными подразумеваются методы, оперирующие данными, полученными АНПА в процессе выполнения задания (согласно [20], понятие интеллектуальной системы управления несколько шире). В качестве таких знаний, в случае, например, измерения некоторого параметра морской среды, выступают результаты измерений, которые определённым образом обрабатываются и на их основе принимается решение о дальнейших действиях АНПА. Особое внимание в данной главе уделено методам на основе групп автономных аппаратов.

## **1.1. Методы решения прикладных задач с использованием одиночных АНПА и их групп**

Использование АНПА обеспечивает возможность формирования произвольных программных пространственных траекторий на основе текущих измерений параметров среды и, следовательно, получения высокой точности оценки параметров среды. Для повышения производительности и надёжности выполнения задания используются группы АНПА. Их работа основана на использовании систем подводной акустической связи, посредством которых АНПА обмениваются результатами измерений при планировании поведения.

Одной из важных задач морского экологического мониторинга является поиск и обследование локальных неоднородностей /ЛН/ в толще воды. Такие ЛН могут иметь как естественное происхождение (поле фитопланктона), так и быть вызванными антропогенным влиянием (поле загрязнения). Полагается, что на АНПА установлен датчик, позволяющий регистрировать концентрацию заданного вещества. Если концентрация вещества в некоторой точке превосходит некоторый порог, то предполагается, что эта точка принадлежит ЛН. Задача заключается в локализации ЛН и оценке ее размеров. Данная информация является важной для

построения корректных моделей, как при организации контр мероприятий в случае загрязнения водных акваторий, так и при планировании рыбопромысловой деятельности на основе данных о полях фитопланктона. Методы поиска и обследования ЛН делятся на параметрические и непараметрические [45]. В параметрических методах рассматривается модель ЛН, определяемая несколькими параметрами, значения которых уточняются в процессе её обследования. При каждом следующем измерении, полученном АНПА, уточняются параметры модели. Тем не менее, такой подход требует выбора адекватной параметрической модели рассматриваемого явления. В непараметрических методах используются другие модели, которые не позволяют использовать небольшое фиксированное количество параметров.

Примером разработки непараметрического метода может служить работа [44]. В ней рассматривается задача локализации шлейфа тёплой воды, сбрасываемой АЭС Калверт Клифс в Чесапикский залив. Предлагается способ формирования траектории АНПА, названный «методом адаптивных трансект». Траектория представляет собой меандр с переменной длиной галса. Длина гласа выбирается в зависимости от ширины шлейфа на рассматриваемом срезе. Решение о том, в шлейфе находится АНПА или нет, принимается на основе скалярной функции, представляющей собой комбинацию нескольких параметров среды. В исследуемые параметры среды входит температура, солёность, скорость течения. Приведены результаты испытаний предложенного алгоритма. Излагается также режим работы предложенного алгоритма, в котором отслеживается граница шлейфа. Для этого траектория формируется с использованием более коротких галсов, которые попеременно входят в шлейф и выходят из него. Работа демонстрирует работоспособность предложенных алгоритмов.

Пример использования АНПА для поиска источника шлейфа излагается в работе [64]. Поиск источника выполнялся на основе управления с несколькими поведением (режимами). В каждый момент времени ровно одно поведение было активно и переключение между ними осуществлялось бинарным образом. Каждое поведение формировало желаемый курс и скорость АНПА. Поведения включали:



поиск шлейфа, следование к источнику шлейфа, возвращение шлейфа в случае потери. Поведение, реализующее следование к источнику шлейфа, формировало курс, следующий против течения когда аппарат находится внутри шлейфа. Серией из 15 запусков была продемонстрирована работоспособность предложенного алгоритма.

Параметрический метод рассмотрен в докладе [45]. Рассматривается плоская модель ЛН в виде эллипса. Для вычисления параметров эллипса используется нелинейный метод наименьших квадратов. В случае использования непараметрических методов производится оконтуривание ЛН. При этом предлагается использовать PD-регулятор и основная задача состоит в выборе величины, для которой осуществляется регулирование (вопрос организации оконтуривания, т.е. движения АНПА по изолиниям поля, изучен и рассмотрен, например, в [17]). Рассматривается также задача определения центра масс ЛН. Были произведены вычислительные эксперименты для одиночного АНПА и для группы, состоящей из двух аппаратов. В одном из экспериментов необходимая точность восстановления положения центра масс при использовании 2 АНПА была достигнута приблизительно в 3 раза быстрее. При этом предполагалось, что аппараты обмениваются информацией о результатах произведённых измерений.

В работе [3] приводятся алгоритмы для оконтуривания областей ЛН и шлейфов, описаны способы формирования траектории движения АНПА, позволяющие построить локальную аппроксимацию границы области ЛН или оценить направление распространения шлейфа. Ставится задача прослеживания границ неоднородности. Для этого рассматривается индикаторная функция, по значению которой можно установить, находится АНПА в ЛН или нет. Предлагается траектория, многократно пересекающая границу неоднородности. При этом рассматривается также задача обнаружения всех неоднородностей в данной акватории с использованием одиночного аппарата. Предложено использовать траекторию типа меандр, выполняя дополнительные манёвры для оконтуривания ЛН.

Обследованиям ЛН типа «шлейф» с использованием групп АНПА посвящена работа [4]. Для локализации шлейфа используется понятие центральной линии – траектории с максимальным значением исследуемого поля, и используется соответствующая математическая модель шлейфа. Предполагается, что между всеми АНПА есть канал связи, по которому каждый из них транслирует информацию о положении центральной линии. Если какой-либо из аппаратов получает информацию с лучшей оценкой положения центральной линией, он корректирует свою траекторию. Управление данного типа можно назвать коллективным, поскольку каждый из участников группы принимает решение самостоятельно, но между ними имеется общий канал, информация из которого используется для выработки наилучшего решения.

Коллективный метод поиска центра ЛН приводится в работе [97]. Каждый аппарат группы периодически получает информацию об измерениях, произведённых другими АНПА, и на основе этого формирует свою траекторию, следуя по градиенту поля, в соответствии с алгоритмами, приведёнными в [73]. Данный способ взаимодействия можно отнести к стайному: каждый аппарат формирует свои дальнейшие действия самостоятельно, и лишь опосредованно получает из внешней среды некоторую дополнительную информацию о действиях других членов стаи.

В процессе выполнения экологического мониторинга водных акваторий и при проведении подводных биологических исследований важной задачей является измерение с требуемой точностью указанных параметров водной среды с целью последующего картографирования. Объектами съёмки могут быть поля температуры, солёности, глубины, концентрации загрязняющих веществ.

В статье [65] приводятся результаты работы группы глайдеров. Конкретных стратегий по формированию траектории обследования работа не содержит, однако в ней разработан механизм получения карты ошибок на основе гауссовых процессов для восстановления параметра среды. Особенностью метода является учёт не только пространственной изменчивости параметра, но и его изменчивости по времени (т.е. рассматривается трёхмерное скалярное поле). Движение группы

организуется с использованием метода виртуальных тел и искусственных потенциалов (VBAR, см. [76]). Метод позволяет задать, используя попарные расстояния, «виртуальное тело» – формацию, которую должны соблюдать аппараты относительно базовой точки. Управление осуществляется путём перемещения базовой точки. Каждый аппарат при этом перемещается на свою позицию относительно базовой точки. Это позволяет регулировать расстояние между аппаратами таким образом, чтобы обеспечить необходимое рассредоточение. Управление группой является централизованным. Каждые два часа глайдер всплывает, уточняет своё местоположение, используя спутниковую навигационную систему, и получает новую путевую точку от центрального узла через спутниковую систему связи. Исследованию управления формациями посвящён также доклад [31]. Механизм планирования миссии для глайдеров представлен в докладе [107]. Задание новых путевых точек осуществляется в автоматическом режиме (иногда под контролем оператора) на основе имеющейся модели океанических течений.

Различным вопросам измерения полей посвящено множество работ. Они различаются не только методами решения, но и постановками задач. Один из подходов к измерению параметров поля – случайное блуждание. В докладе [90] рассматривается задача измерения поля с использованием одного датчика, свободно перемещающегося по заданной области. Вся область делится на участки. При этом точка для каждого следующего измерения выбирается случайно, но плотность вероятности этого выбора зависит от результатов предыдущих измерений. Затраты на перемещение датчика от одной точки измерения до другой не учитываются.

Другой подход использует итерационные процедуры, в которых на каждом шаге формируется новая точка для измерения, при этом оптимизируется некоторая информационная метрика. Такой подход используется в работах [77, 109, 110, 112], которые различаются используемыми метриками и алгоритмами поиска оптимального решения. К итерационным относится и алгоритм, предложенный в работе [43]. Ставится задача измерения поля для последующего

восстановления с заданной точностью (при определенных условиях на гладкость). Предполагается использование нескольких АНПА, при этом на каждом шаге алгоритма для каждого АНПА происходит выбор следующей точки измерения. Вокруг каждого аппарата строится окружность доверительного радиуса и на ней выбирается точка. Доверительный радиус рассчитывается исходя из требуемой погрешности восстановления на основе оценки ошибки восстановления поля методом радиальных базисных функций. Выбор конкретных точек на окружности осуществляется путем минимизации функционала, «притягивающего» аппараты к тем точкам рассматриваемой области, которые еще не находятся ни в одной доверительной окружности. Если таких точек нет, то алгоритм завершает свою работу. Таким образом, время, необходимое для перехода от одной точки измерения до другой не учитывается и не ставится задача его минимизации. Более того, на каждом шаге алгоритма требуется синхронизация аппаратов: расчет следующего шага должен быть осуществлен только тогда, когда все АНПА выполнили предыдущий шаг. В работе [42] описанный подход развивается для случая ограниченного радиуса коммуникации между аппаратами: движение осуществляется так, чтобы граф коммуникации оставался связным. Существуют также подходы к обследованию областей сложной формы [75, 85].

Другой прикладной задачей, для решения которой исследуются подходы на основе групп АНПА, является поиск мин. Доклад [88] посвящен групповому алгоритму обследования заданной акватории на предмет наличия мин. Используется следующая модель. Акватория разбивается на квадраты и для каждого из них поддерживается вероятность обнаружения мины в указанном квадрате. Прохождение АНПА через квадрат изменяет данную вероятность. Предполагается централизованное управление АНПА путём назначения им заданий. В качестве задания выступает посещение одного из квадратов. В работе исследуются различные эвристические стратегии для назначения заданий. С использованием вычислительных экспериментов оценивается их эффективность.

## **1.2. Существующие модели и алгоритмы для управления группами мобильных роботов**

Имеется широкое многообразие моделей и алгоритмов, предложенных в настоящее время для управления группами роботов, обусловленное разнообразием решаемых в данной области задач. Согласно [14], стратегии группового управления соответствуют централизованному и децентрализованному управлению.

Стратегии централизованного управления могут реализовывать единоначальное или иерархическое управление. При единоначальном управлении имеется центральное управляющее устройство, отдающее команды роботам группы. При иерархическом управлении имеется дерево иерархии управляющих устройств.

Децентрализованное управление, в свою очередь, подразумевает отсутствие выделенного устройства и может быть коллективным или стайным. Каждый участник группы принимает решение на основе доступной ему информации. Коллективное управление подразумевает наличие общего канала связи между всеми роботами, что позволяет им вырабатывать коллективные планы, используя специальные алгоритмы.

Стайное управление не полагается на канал связи между участниками группы. Каждый из них получает информацию о действиях других участников группы косвенно, из окружающей среды посредством датчиков. Примером стайного управления может служить подход к решению «задачи о диффузной бомбе» [18]. В данной задаче рассматривается движение группы объектов при поиске или уничтожении неподвижного целевого объекта. Каждый подвижный объект выбирает траекторию движения на основе доступной ему от имеющихся датчиков информации о положении других подвижных объектов.

В различных условиях целесообразно применение различных стратегий управления. Например, как отмечено в [33], при возрастании количества участников группы и ограниченном времени принятия решения, приходится переходить к децентрализованным схемам. При децентрализованном управлении

каждый участник рассматривается как самостоятельный агент, взаимодействующий с окружением. В случае, когда в качестве элементов группы рассматриваются не просто роботы, а некоторые абстрактные агенты, говорят о применении мультиагентного подхода [21, 22, 80]. В применении к АНПА в качестве агентов могут рассматриваться как сами аппараты [67, 74], так и отдельные задания в системе управления [13].

Задача распределения заданий внутри группы роботов (multi-robot task allocation /MRTA/) состоит в том, чтобы назначить имеющиеся задания (которые могут заключаться в требовании посетить заданную точку пространства, обследовать заданный участок и т. д.) роботам группы и определить порядок их выполнения. При этом необходимо минимизировать некоторый функционал, который может включать общее время выполнения задания, суммарный пройденный путь и т.д. Если рассматривать задачи данного типа с точки зрения формирования команд в рамках теории управления организационными системами [25], то они относятся к «задаче о назначении» (имеется ввиду не конкретная задача о назначениях, а собирательный образ подобных оптимизационных задач).

В работе [68] приводится классификация задач MRTA. Показано, что, несмотря на разнообразие постановок, они чаще всего сводятся к широко известным задачам дискретной оптимизации, таким как задача о назначениях или нескольких странствующих коммивояжёрах (multiple travelling salesman problem /MTSP/ [100]).

В случае если весь набор заданий известен заранее, может быть применено предварительное централизованное планирование. Так, в работе [94] рассматривается задача распределения неподвижных целей внутри группы летательных аппаратов. Необходимо посетить все цели, минимизировав функционал, который представляет собой взвешенную сумму максимального и суммарного времени, затраченного всеми роботами. Задача формулируется в терминах целочисленного программирования, и предлагаются точный и приближённый методы решения задачи. Централизованное планирование в группе летательных аппаратов рассматривается и в работе [26], где решение

похожей задачи предлагается разделить на три фазы: распределение заданий между аппаратами, решение задачи коммивояжера для каждого аппарата, планирование пути между парами заданий. При этом задания разделены на точечные (их требуется посетить) и площадные (их обработка занимает некоторое время).

Другой класс алгоритмов — это алгоритмы коллективного планирования, возникающие в децентрализованных системах. Их использование целесообразно, например, для ситуаций, когда задания добавляются по мере работы группы или когда центральный узел недоступен. Такие алгоритмы предполагают некоторый процесс согласования при выборе заданий. Один из способов согласования в группировке роботов — аукционный метод. При появлении нового задания некоторые роботы делают «ставки», оценивая свои затраты для выполнения этого задания. Такие алгоритмы использованы в работах [70, 71]. Обзор аукционных методов проделан в статье [61]. В работах [36, 49, 56, 66, 98] приводятся алгоритмы решения специфических постановок задачи планирования и исследуются другие подходы.

Задачи, возникающие при исследовании моделей коллективного управления, могут быть решены с использованием итерационной процедуры согласования. Так, в работе [15] рассматривается итерационный алгоритм улучшения плана при коллективном управлении. Используется математическая модель задачи о назначениях: задаётся матрица, которая определяет вклад в целевой функционал для каждой пары робот – задача. Ставится задача максимизации данного функционала. Классическая задача о назначениях может быть решена за время порядка  $O(n^3)$  с использованием «венгерского» алгоритма (здесь  $n$  – максимум из количества задач и количества исполнителей). Однако при этом необходимо, чтобы имелся единственный вычислитель, и матрица была известна ему целиком, что несправедливо при коллективном управлении. В работе предполагается составление оптимального плана и обмен отдельными заданиями или конструирование цепочек обмена.

Задача коллективного управления рассматривается и в докладе [23]. Ставится задача патрулирования или обследования большой акватории, разбитой на области. Каждой из областей назначен приоритет. Координатор каждой области может отдавать команды по переназначению АНПА областям. Считается, что каждый координатор не имеет полной информации о количестве аппаратов в его области. С использованием формализма дискретных событийных систем ([2, 99]) оценено число шагов перераспределения аппаратов между областями, через которое желаемо распределение будет достигнуто. С задачей патрулирования связана также работа [5], однако в ней используется другая математическая модель патрулирования и все АНПА движутся по фиксированным траекториям. При использовании коллективного управления в группе АНПА, одним из критически важных вопросов является обеспечение связи. Этому посвящён, например, доклад [57], в котором также рассматривается задача патрулирования, но исследование посвящено больше устойчивости гидроакустической связи.

Алгоритмы централизованного и коллективного планирования находят применение в системах управления группами роботов [41, 71, 81, 82, 105]. В системе ALLIANCE [82] рассматривается распределение заданий в группе разнородных роботов. Используются алгоритмы, основанные на «жадном» подходе, в котором каждый раз среди невыполненных заданий выбирается то, которое потребует наибольших или наименьших затрат. Развитие этой системы, L-ALLIANCE, использует механизмы машинного обучения для того, чтобы учитывать различия в способностях роботов. В работе [41] описана система GRAMMPS, в которой производится централизованное планирование. Для решения возникающих задач дискретной оптимизации предлагается использовать полные или частичные решения в зависимости от размера задачи.

Экспериментальный проект CENTIBOTS [81] посвящён управлению группой более чем из ста роботов для решения обследовательских задач в помещении. В каждый момент времени в системе имеется набор неподвижных целей, которые необходимо посетить. Планирование может осуществляться в



двух режимах: централизованном и коллективном. В централизованном режиме план посещения целей строится на основе приближённого решения задачи MTSP с использованием «жадного» алгоритма. Коллективное планирование основано на методе аукционов. При этом отмечается, что в начале работы системы объем передаваемых об аукционах сообщений столь велик, что пропускная способность коммуникационной сети оказывается недостаточной. Система MissionLab используется в Georgia Institute of Technology для управления разнородными (летательными, наводными, подводными) аппаратами. Для решения задачи MRTA в ней используется аукционный метод [105].

В работе [16] исследована задача, в которой задано множество целей на плоскости и необходимо разработать план посещения как можно большего их количества аппаратами группы (т.е. используется модификация обыкновенной, «точечной» модели). Ставится задача оптимизации. Целевой функционал представляет собой сумму функционалов для каждого аппарата, наподобие того, который используется в задаче о назначениях. Добавляются ограничения на длину траектории каждого АНПА (что связано с ограниченностью запаса батареи) и ограничения на радиус коммуникации. Максимизация используемого функционала при заданных ограничениях не обязательно влечёт за собой посещение всех целей. Для решения поставленной задачи оптимизации используется генетический алгоритм, позволяющий гибко задавать ограничения на траектории аппаратов. Исследуются как траектории с возвратом в точку старта, так и разомкнутые траектории.

Работа [52] посвящена методу построению плана для посещения группой АНПА нескольких точечных целей. При этом накладывается ограничение на кривизну траекторий АНПА. Получаемые траектории соответствуют модели Дубинса [63], модифицированной для случая наличия течения. Данная модель сложнее точечной, поскольку состояние аппарата при входе в новое задание должно включать не только его координаты, но и курс. В работе предлагается использовать алгоритм на основе аукционного метода для формирования оптимального пути. В начале работы алгоритма все задания (точки на плоскости)

кластеризуются методом  $k$ -средних по количеству аппаратов и из каждого кластера выбирается тройка заданий для назначения соответствующему АНПА. Далее задания рассматриваются по одному в определённом порядке. Каждый аппарат пытается вставить новое задание во все возможные позиции своего текущего плана и вычисляет его стоимость. Аппарат с наименьшей полученной таким образом стоимостью считается выигравшим аукцион и вставляет новое задание в свой план. В данной модели для пары точек существует множество путей между ними, отличающихся начальным и конечным курсом АНПА. При добавлении нового задания в план считается, что курс входа в каждое задание остаётся прежним и осуществляется перебор из ограниченного количества значений лишь для курса входа в новое задание. В разд. 2.2.2 возникает подобная задача и излагается техника её решения за полиномиальное время на основе динамического программирования.

Аукционный метод предлагается использовать и в [111]. В данной работе рассматривается модель задачи, в которой задания являются точечными, однако имеется два типа аппаратов: одни используются для поиска целей, другие – для их классификации. Для оптимизации работы группы в рамках данной модели предлагается использование аукционного метода, в котором аппараты первого типа выносят задания на аукцион, а аппараты второго типа делают ставки.

В докладе [72] рассматривается задача составления оптимального плана миссии для группы АНПА. Предлагается модель, в которой обследование прямоугольного участка акватории с помощью меандра является отдельным заданием. Миссия состоит из набора таких прямоугольников. Для  $i$ -ого прямоугольника рассматриваются координаты его центра  $(x_i, y_i)$  и алгоритм планирования использует евклидово расстояние между центрами прямоугольников как оценку времени перехода от одного задания к другому. Такая модель пренебрегает размерами обследуемых прямоугольников, что справедливо лишь в случае, если расстояния между прямоугольниками намного больше их размеров. Для решения задачи MTSP, возникающей при реализации алгоритма планирования, предложено использовать метод колонии муравьёв

(см. [62]). Данный метод является итерационным эвристическим. Ребру между двумя вершинами графа (вершины соответствуют прямоугольникам для обследования)  $i$  и  $j$  ставится в соответствие действительное число  $\tau_{ij}$  (т.н. «уровень феромона»). Строится случайный путь в графе. При добавлении нового ребра к пути, оканчивающемуся вершиной  $i$ , рассматриваются  $\tau_{ij}$  для всех  $j$ , ещё не входящих в путь и на её основе вычисляется вероятность попадания соответствующего ребра. В зависимости от стоимости полученного пути изменяются значения  $\tau_{ij}$  для входящих в него рёбер. С целью обобщения метода колонии муравьёв для формирования нескольких цепей в графе, в работе предлагается ввести параметр  $L_0$  – запрещённое расстояние.

### **1.3. СПУ, обеспечивающие групповую работу АНПА**

Для эффективного управления группой АНПА необходимы специализированные СПУ. В настоящее время в различных научно-исследовательских организациях ведётся разработка СПУ, обеспечивающих групповую работу АНПА, что отражено в ряде работ.

В лаборатории подводных систем и технологий (LSTS) университета Порто (Португалия) ведётся разработка программного обеспечения для управления совместной работой разнородных автономных аппаратов (подводных, поверхностных, летательных) [60]. Унифицированная СПУ под названием DUNE [86] использует прикладной протокол передачи сообщений ИМС [79] для обмена как между модулями СПУ на борту аппарата, так и для обмена сообщениями между аппаратами. Также разработан пульт оператора, позволяющий одновременно отслеживать состояние нескольких аппаратов. Каждый аппарат в системе DUNE имеет план, представляющий собой либо траекторию движения, либо команду следования за другим аппаратом. План задаётся оператором, то есть в системе в настоящее время отсутствует механизм распределения заданий и построения коллективных планов.

Подход, при котором распределение заданий между АНПА происходит перед выполнением миссии, используется в работе [72]. При этом в качестве заданий рассматриваются обследования площадных участков, а для расчёта

оптимальных планов используется модификация оптимизации методом колонии муравьёв.

Одной из СПУ АНПА с открытым исходным кодом является MOOS-IvP [39]. На бортовом вычислителе аппарата одновременно работает несколько модулей, обменивающихся данными через общую память, называемую MOOS-DB. Целевые параметры движения АНПА определяются с использованием функции полезности, заданной на основе возможных действий аппарата (см. диссертацию [38]). Функция полезности формируется как взвешенная сумма нескольких одновременно работающих поведений. Областью, на которой определена такая функция, может являться трёхмерное пространство «курс–скорость–глубина». Например, при движении АНПА к заданной точке акватории могут действовать два поведения: одно формирует функцию полезности, которая тем больше, чем ближе курс АНПА к курсу на целевую точку; другое поведение даёт больший вес курсам, отворачивающим от препятствий. Перемещение аппарата на основе общей целевой функции позволяет добраться до заданной целевой точки, не столкнувшись с препятствиями. Для решения задачи оптимизации используется метод на основе представления целевых функций кусочно-линейным образом.

Алгоритмы группового управления в MOOS-IvP реализуются в виде дополнительных модулей. Так, в работе [59] предлагается групповое взаимодействие АНПА по следующей схеме. Имеется центральный узел, который является источником заданий (это может быть компьютер, контролируемый оператором, или АНПА, на который загружен полный план миссии). Рассматриваются простые задания вида «посетить точку». По мере возникновения заданий центральный узел публикует информацию о них и собирает заявки на её выполнение от аппаратов. Аппарат, который предложит наискорейшее выполнение задания и получает его. Это пример т.н. аукционного планирования. На базе MOOS-IvP оно реализовано в виде двух программ: центрального узла, публикующего задания, и аукционера на каждом аппарате, делающего ставки.

Если аукционеру назначено задание, то он влияет на функцию полезности своего АПНА.

В настоящее время в основе систем управления АНПА лежат идеи гибридной программной архитектуры (см. [1]). В соответствии с ней вся система управления делится на три уровня:

- Нижний уровень управления исполняет элементарные действия. Он наиболее приближен к бортовым устройствам и работает реактивно (то есть отвечает локальными реакциями на меняющиеся условия).
- Средний уровень разбивает план на элементарные действия и обобщает информацию с датчиков для передачи её верхнему уровню управления.
- Верхний уровень управления строит план действий в соответствии с имеющейся миссией и моделью среды.

Каждый уровень передаёт нижестоящему команды, а принимает данные, отражающие текущую обстановку. К гибридным СПУ относятся, например, DUNE [86], DSAAV [50] (университет Сингапура), СПУ ИПМТ ДВО РАН [1]. Некоторые СПУ используют иные принципы. Так, примером СПУ, основанной на поведении, может служить MOOS-IvP [39]. В системе TRex [92] управление осуществляется на основе иерархической структуры по схеме восприятие – модель – план – действие.

#### **1.4. Выводы**

Задача поиска ЛН и оценки их параметров и задача съёмки параметра среды с заданной точностью являются важными и актуальными.

В существующих методах оценки параметров ЛН, как правило, предполагается, что неоднородность одна, и она уже найдена. Существующие методы оценки параметров ЛН, основанные на группах АНПА, связаны в основном с поиском центра ЛН. Актуальной является разработка метода, позволяющего найти в заданной акватории все ЛН и осуществить оценку их параметров. При такой постановке задачи целесообразно использование группы АНПА для повышения эффективности работы. Возникает необходимость в

разработке метода, позволяющего эффективно распределить задания по поиску и оценке параметров локальных неоднородностей между аппаратами группы.

Среди методов оценки параметров среды преобладают итерационные методы, основанные на информационных подходах. В большинстве работ, исследуемый параметр морской среды рассматривается как реализация некоторого случайного процесса. Существуют методы для гауссовых моделей этих процессов и для различных первоначальных конфигураций (например, если измерения в некоторых точках уже произведены). Актуальна разработка группового метода, позволяющего произвести съёмку параметра среды с заданной точностью, без пропусков, оптимизируя при этом время выполнения работы в целом.

Актуальна разработка модели групповой работы АНПА, которую можно было бы использовать для широкого спектра обзорно-поисковых задач. Целесообразно внедрение в одну из гибридных СПУ поддержки групповых операций АНПА по схеме централизованного управления в рамках разработанной модели. Централизованная схема выбрана по следующим причинам:

- Централизованное управление не требует процедур согласования между АНПА, как того требуют аукционные методы коллективного планирования. Это снижает общее количество передаваемых сообщений. Специфика водной среды заключается в низкой пропускной способности систем связи, поэтому при составлении групповых алгоритмов важно это учесть. Некоторые из существующих коллективных методов требуют, например, передачи сообщений между членами группы по цепочке, что затруднительно в случае перебоев связи.
- Децентрализация управления роботами становится эффективной с увеличением числа роботов [32], поскольку имеется компромисс между децентрализацией, влекущей неоптимальность решения с одной стороны, и централизацией, требующей вычислительных ресурсов и наличия связи со всеми членами группы с другой стороны. АНПА до сих пор остаются

«штучными» изделиями и имеется возможность составления групп лишь небольшого их числа.

При выполнении АНПА заданий в динамической неструктурированной среде возможны непредвиденные ситуации и нарушения плана. Должен осуществляться постоянный контроль над выполнением плана и перепланирование в случае его нарушения. В настоящей работе рассмотрено перепланирование в случае выхода из строя одного из подводных аппаратов. При одновременной работе группы АНПА предполагается наличие постоянной акустической связи каждого исправного подводного аппарата с центральным узлом, которым может быть как судовой пост оператора, так и один из АНПА. Все АНПА оснащены навигационной системой, обеспечивающей требуемую точность определения местоположения АНПА.

## **ГЛАВА 2. ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ МИССИИ В ГРУППЕ АНПА**

Настоящая глава посвящена методу организации работы группы АНПА для выполнения общей обзорно-поисковой миссии.

Миссия рассматривается как набор неделимых независимых заданий. Каждое задание должно быть выполнено одним АНПА и не может быть прервано. В отличие от стандартной постановки подобных задач, предполагается, что каждое задание может быть выполнено несколькими возможными способами, отличающимися точкой старта, точкой финиша и продолжительностью. Самый простой пример задания с несколькими вариантами выполнения – проход по отрезку, который может быть выполнен в двух возможных направлениях.

Ставится задача составления оптимального плана, и исследуются алгоритмы её решения. В качестве критерия оптимальности выбрано общее время выполнения миссии. Предусмотрены механизмы контроля над выполнением плана и его корректировка в случае возникновения непредвиденных ситуаций (например, выход одного из аппаратов из состава группы).

### **2.1. Постановка задачи планирования**

При выполнении обзорно-поисковой миссии с использованием АНПА, существенным фактором является время выполнения. Оно может иметь значение, как по экономическим (в случае использования сопровождающего судна), так и по другим причинам (например, в случае съёмки физического поля среды, изменяющегося во времени).

При использовании группы АНПА для решения обзорно-поисковой задачи очевидной является стратегия, при которой не используются специальные инструменты управления группой: район поиска разбивается на несколько равных частей (по количеству аппаратов) и каждый АНПА обследует свой участок независимо. Такой подход обладает следующими недостатками:

1. Не учитывается время перехода от точки старта каждого АНПА к начальной точке траектории обследования.



2. При выходе одного аппарата из состава миссии, его часть района остаётся непокрытой. В более общем случае возможна и ситуация, при которой один из АНПА добавляется в состав группы. Перераспределение работы между аппаратами в таком случае, без средств автоматизации становится затруднительным.
3. В случае если траектория формируется по мере выполнения миссии (например, выявлена необходимость дополнительного обследования в отдельных областях), возможна ситуация, при которой один из АНПА завершит обзор своего района существенно раньше остальных. Он может быть использован для обследования районов, порученных другим АНПА, но оптимальное перераспределение работы без средств автоматизации становится затруднительным.

Таким образом, при минимизации общего времени выполнения миссии необходимо учитывать время, необходимое как для перемещения АНПА вдоль траектории обзора/поиска, так и для перемещения между такими траекториями, а также для перемещения от первоначального положения к месту старта миссии.

Необходимо также иметь возможность изменять состав группы и учитывать, какая часть общей миссии уже выполнена, а какая – ещё нет. Это особенно важно при выполнении миссии, в которой возможны сбои при запусках отдельных аппаратов. Так, например, в работе [89] опубликована статистика, согласно которой при поиске затонувшего самолёта рейса Air France 447 доля успешных запусков при использовании трёх АНПА Remus 6000 составила порядка 67%. Причинами ошибок являются, помимо сбоев оборудования, и ошибки в программировании миссии.

Традиционный подход при составлении миссии АНПА состоит в задании последовательности действий [1], представляющих собой фактически программу, которую аппарат должен выполнить. Такой подход обычно называется императивным в отличие от декларативного подхода, при котором имеется текстовое описание заданий без указания жёсткого порядка их выполнения и описания переходов между ними. При выполнении миссии, заданной

декларативно, требуется планирование, т.е. преобразование набора заданий в последовательность элементарных команд. Для управления группой АНПА целесообразно декларативное представление миссии. Задача планирования состоит в определении порядка выполнения заданий и в распределении заданий между аппаратами оптимальным образом с учётом имеющихся ограничений.

Будем считать, что миссия представляет собой набор заданий. Типичное задание для АНПА – проход по отрезку на заданной глубине с включённым датчиком (например, с гидролокатором бокового обзора). Несколько проходов по отрезку позволяют осуществить площадную съёмку. Примером более сложного задания является оконтуривание неоднородности морской среды [30]. Для простоты планирования будем считать задания неделимыми, т.е. каждое задание должен выполнить единственный аппарат, не останавливаясь в процессе выполнения.

Некоторые задания имеют несколько вариантов выполнения. Так, проход по отрезку может быть осуществлён двумя способами: в прямом и в обратном направлении. Задание по покрытию прямоугольной площади меандром может быть выполнено как минимум восемью способами, в зависимости от направления обхода и угла, с которого следует начать обход.

Для организации работы групп мобильных роботов применяют как централизованное, так и децентрализованное (распределенное) управление. В настоящей работе используется централизованная схема. Кратко повторим причины такого выбора:

- При централизованном управлении протокол обмена данными и командами устроен проще, чем при распределенном. Количество и объем передаваемых сообщений имеет значение, поскольку используются гидроакустические системы связи, имеющие низкую пропускную способность.
- В небольших группах централизованное планирование может быть организовано более эффективно, чем распределенное. При увеличении численности группы это преимущество пропадает из-за возрастающей

сложности задачи планирования [32]. В настоящей работе предполагается использование небольшой группы АНПА (не более 5-7 аппаратов).

При использовании группы однородных АНПА для выполнения задания появляется возможность повысить скорость и надежность выполнения миссии по сравнению с применением одиночного аппарата. Увеличение скорости выполнения миссии достигается путем оптимизации времени ее выполнения. Вероятность успешного выполнения миссии обеспечивается контролем ее выполнения и корректировкой в случае возникновения внеплановых ситуаций. Для этого используется планировщик, расположенный в центральном узле и имеющий информацию о миссии и о ходе ее выполнения.

В процессе выполнения миссии необходимо корректировать имеющийся план в следующих случаях:

- Аппарат вышел из состава миссии. Это может произойти не только в результате поломки, но и в случае, если аппарату подана более приоритетная команда телеуправления.
- Аппарат включён в состав миссии.
- Аппарат выполнил план. В случае оптимального планирования, в момент завершения одиночного плана не существует свободных заданий, которые можно было бы поручить освободившемуся АНПА. Однако это возможно при расхождении реального и планируемого времени выполнения заданий возможно.

С учётом сказанного, может быть поставлена задача составления оптимального плана, учитывающая доступность и возможности каждого АНПА, их текущие положения, варианты выполнения каждого задания. Перебор всех вариантов для нахождения оптимального решения в этой задаче трудоёмок даже для небольших примеров (порядка 10 заданий и 3 АНПА).

Чтобы сохранить универсальность постановки, сделаем следующее предположение. Будем считать, что миссия состоит из независимых неделимых заданий, т.е. задания могут быть выполнены в любом порядке, любым АНПА (из тех, которые имеют возможность выполнить данное задание). При этом

неделимость задания означает, что если его выполнение прервано, оно считается невыполненным вообще.

Пусть имеется  $m$  аппаратов и  $n$  заданий. Планирование происходит перед началом выполнения миссии и каждый раз, когда необходимо выполнить перепланирование. Известно, что  $q$ -ый аппарат через время  $u_q$  окажется в точке  $\mathbf{s}_q$  трёхмерного пространства и будет готов к выполнению заданий (если аппарат  $q$  готов к выполнению задания на момент планирования, то  $u_q = 0$ ). Положим, что имеется функция  $d_q(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ , обозначающая время перехода АНПА от точки  $\mathbf{a}$  к точке  $\mathbf{b}$ . Она может иметь простой вид, например  $d_q(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = |\mathbf{a} - \mathbf{b}| / U_q$ , где  $U_q$  – оптимальная скорость  $q$ -ого АНПА, или более сложный. Для  $i$ -ого задания дано  $v_i$  вариантов его выполнения и  $j$ -ый вариант для  $q$ -ого аппарата характеризуется тройкой  $(\mathbf{a}_{i,j}, \mathbf{b}_{i,j}, l_{i,j,q})$ , обозначающей соответственно точку начала задания, точку окончания и оценку времени его выполнения.

Планом аппарата назовём кортеж пар  $p = ((i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_{|p|}, j_{|p|}))$  такой, что  $i_k \in 1..n$ ,  $j_k \in 1..v_{i_k}$  для всех  $k \in 1..|p|$ . Выполнение плана  $q$ -ым аппаратом начинается в точке  $\mathbf{s}_q$  в момент времени  $u_q$ . Вначале аппарат переходит к точке  $\mathbf{a}_{i_1, j_1}$  и выполняет  $j_1$ -ый вариант задания  $i_1$ . Затем аппарат переходит к точке  $\mathbf{a}_{i_2, j_2}$  и т.д. Выполнение плана заканчивается в точке  $\mathbf{b}_{i_{|p|}, j_{|p|}}$ . Таким образом, время выполнения плана  $p$  аппаратом с номером  $q$  есть

$$t_q(p) = u_q + d_q(\mathbf{s}_q, \mathbf{a}_{i_1, j_1}) + \sum_{k=2}^{|p|} d_q(\mathbf{b}_{i_{k-1}, j_{k-1}}, \mathbf{a}_{i_k, j_k}) + \sum_{k=1}^{|p|} l_{i_k, j_k, q}. \quad (1)$$

Общим планом является кортеж планов  $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$  такой, что каждое задание встречается среди его планов ровно один раз и ровно в одном варианте. Время выполнения общего плана определяется выражением:

$$t(P) = \max_{q \in 1..m} t_q(p_q), \quad (2)$$

поскольку миссию можно считать завершённой только после того, как все аппараты завершили работу. Задача состоит в том, чтобы при известных  $u_q$  и  $\mathbf{s}_q$ , известных заданиях и вариантах их выполнения найти общий план  $P$ , минимизирующий  $t(P)$ :

$$t(P) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Задача составления плана сходна с задачей коммивояжёра (TSP), для которой существуют методы получения как точных, так и приближённых решений, которым посвящены книги [35, 54, 100]. Полученная задача является более широкой её версией из-за наличия нескольких коммивояжёров и более сложной постановки: при планировании не просто посещаются вершины некоторого графа, а является существенным, какой вариант выполнения задания будет выбран. Задача коммивояжёра получается из задачи (3) при следующих упрощающих предположениях:  $m = 1$ ,  $v_i = 1$ ,  $\mathbf{a}_{i,1} = \mathbf{b}_{i,1}$ ,  $l_{i,1} = 0$ ,  $u_q = 0$ .

Известна также задача нескольких коммивояжёров (см., например, книгу [100]). С помощью дополнительного построения она сводится к TSP (добавляются фиктивные вершины, посещение которых означает смену коммивояжёра). Однако её стандартная постановка подразумевает минимизацию суммы пути, пройденного каждым коммивояжёром, а не минимизацию максимума (см. выражения (2) и (3)). Решение подобных задач относят также к области исследования операций и теории расписаний [11]. В данной области имеется ряд моделей, как правило, приводящих к задачам дискретной оптимизации. Одни задачи такого рода допускают алгоритм решения с полиномиальным временем работы (задача о назначениях, задача о выборе заявок [19], задача Джонсона), для других полиномиальные алгоритмы неизвестны (задача построения расписаний программных движений промышленных роботов).

Таким образом, поставленная задача является обобщением TSP и для её решения могут быть применены обобщающие модификации соответствующих алгоритмов.

## 2.2. Алгоритмы составления оптимального плана

Алгоритмы для решения TSP можно поделить на два класса: точные и приближённые. К приближённым относятся различные эвристические стратегии (например, жадная стратегия, эвристика Кристофидеса и др.) и итерационные алгоритмы (генетические алгоритмы, метод отжига, эвристика Лина-Кернигана и др.). Для различных алгоритмов существуют оценки в худшем (как для эвристики

Кристофидеса), так и в среднем случае. К точным алгоритмам решения TSP относятся полный перебор, алгоритм Хельда-Карпа, методы, основанные на LP-релаксации исходной задачи и др. При этом для некоторых успешных методов, основанных на построении LP-релаксации (им посвящена книга [35]), не существует в настоящее время достаточно точных оценок времени работы.

Для решения задачи планирования в вычислительных экспериментах, изложенных в настоящей работе, применялась обобщающая модификация алгоритма Хельда-Карпа, и алгоритм, основанный на жадной стратегии. Указанные подходы были выбраны, поскольку алгоритм Хельда-Карпа обеспечивает точное решение, и имеет наилучшую доказанную оценку времени работы из существующих точных алгоритмов для TSP. Алгоритм, основанный на жадной стратегии, был выбран, поскольку он естественным образом получается при применении аукционных методов распределения заданий в группе мобильных роботов.

### 2.2.1. Модификация алгоритма Хельда-Карпа

Данный алгоритм доставляет точное решение задачи (3). Он основан на идее динамического программирования и представляет собой модификацию алгоритма Хельда-Карпа [69], решающего задачу коммивояжера. Исходная постановка TSP такова: имеется полный граф (с множеством вершин  $V$ ), каждому ребру которого сопоставлено число – стоимость ребра. Необходимо построить цикл минимальной стоимости, проходящий по всем вершинам ровно один раз. В алгоритме Хельда-Карпа предлагается решать задачу методом динамического программирования. Не ограничивая общности, будем строить искомый цикл, начиная с некоторой вершины  $r \in V$ , каждый раз добавляя к пути новую, еще не взятую вершину. Состояние такого процесса описывается (для фиксированного  $r$ ) парой  $(r', V')$ , где  $r'$  – последняя добавленная вершина, а  $V'$  – множество уже добавленных вершин ( $V' \subseteq V$ ). Обозначим за  $B(r', V')$  стоимость минимального пути, описываемого парой  $(r', V')$ . Очевидно, что  $B(r, \{r\}) = 0$ . Остальные значения могут быть найдены с использованием простых правил перехода. Зная

все значения  $B(r', V)$  легко найти длину кратчайшего цикла, которая составит  $\min_{r' \in V} (B(r', V) + c(r', r))$ , где  $c(r', r)$  – стоимость ребра из  $r'$  в  $r$ .

Вернёмся к нашей задаче для нескольких аппаратов. С помощью двоичного поиска задача сводится к следующей: найти план со временем выполнения не более  $T'$ , либо установить, что его не существует (если плана не существует,  $T'$  следует увеличить, иначе – уменьшить). Для решения последней задачи применим метод динамического программирования. Рассмотрим последовательное составление плана для каждого подводного аппарата, при этом будем осуществлять лишь такие переходы, при которых время выполнения не превысит  $T'$ . Состояние системы описывается тройкой  $(q, S, \mathbf{x})$ , где  $q$  – номер текущего аппарата,  $S$  – подмножество заданий, которые уже включены в план,  $\mathbf{x}$  – точка, в которой в конце текущего плана будет находиться аппарат  $q$ . Точка  $\mathbf{x}$  может быть любым из  $\sum_{i \in 1..n} v_i + m$  элементов последовательности  $X = (\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_m, \mathbf{b}_{1,1}, \dots, \mathbf{b}_{n,v_n})$ , поскольку в конце плана аппарат либо находится в своём начальном положении (если план пуст), либо в конечной точке последнего задания, выполненного в соответствующем варианте.

Обозначим за  $\tilde{t}_{T'}(q, S, \mathbf{x})$  минимальное время выполнения плана для  $q$ -ого аппарата, в следующем состоянии: для аппаратов  $1..q-1$  планы уже построены и время выполнения каждого из них не превышает  $T'$ , использованы задания из подмножества  $S$ , текущий план для аппарата  $q$  заканчивается в точке  $\mathbf{x}$ . Если такое состояние невозможно, то положим  $\tilde{t}_{T'}(q, S, \mathbf{x}) = \infty$ . Первоначально известно, что  $\tilde{t}_{T'}(1, \{\}, \mathbf{s}_1) = u_1$ , что означает, что аппарат 1, не выполнив ни одного задания, будет находиться в точке  $\mathbf{s}_1$  через время  $u_1$ . Далее, используем следующие правила перехода:

$$\tilde{t}_{T'}(q, S, \mathbf{s}_q) = \begin{cases} u_q, & \text{если } \min_{\mathbf{x}} \tilde{t}_{T'}(q-1, S, \mathbf{x}) \leq T', \\ \infty, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{t}_{T'}(q, S \cup \{i\}, \mathbf{b}_{i,j}) = l_{i,j,q} + \min \left[ \tilde{t}_{T'}(q, S, \mathbf{s}_q) + d_q(\mathbf{s}_q, \mathbf{a}_{i,j}), \min_{i_1 \in S} \min_{j_1 \in 1..v_{i_1}} (\tilde{t}_{T'}(q, S, \mathbf{b}_{i_1, j_1}) + d_q(\mathbf{b}_{i_1, j_1}, \mathbf{a}_{i,j})) \right], \quad (5)$$

Правило перехода (4) служит для завершения формирования плана аппарата с номером  $q - 1$  и начала формирования плана для аппарата  $q$ . При этом если для заданного  $S$  время выполнения оптимального плана для АНПА с номером  $q - 1$  превышает  $T'$ , это значение  $S$  не может быть использовано для дальнейшего формирования плана на данном шаге. Правило (5) используется для добавления задания  $i$  в варианте выполнения  $j$  к текущему плану аппарата  $q$ . При этом аппарат переходит в точку  $\mathbf{b}_{i,j}$ , приводя, таким образом, процесс планирования в состояние  $\tilde{t}_T(q, S \cup \{i\}, \mathbf{b}_{i,j})$ . При этом, перед добавлением задания  $i$  план АНПА  $j$  был либо пуст, либо уже содержал задание  $i_1$ . Этому соответствует два аргумента минимума в выражении (5). Во втором случае следует также перебрать вариант  $j_1$  выполнения задания  $i_1$ . Искомый план со временем выполнения не более  $T'$  существует тогда и только тогда, когда

$$\min_{\mathbf{x}} \tilde{t}_T(m, \{1, \dots, n\}, \mathbf{x}) \leq T'. \quad (6)$$

Восстановив аргументы, на которых достигается минимум выражения (5), несложно получить и сам план.

Полученный алгоритм представлен на рис. 1. Здесь  $T$  – оценка ответа сверху,  $\varepsilon$  – величина, на которую допускается превышения стоимости плана над оптимальной. Основная часть алгоритма представляет собой цикл из шагов 6-15, проходящий по состояниям. Он выполняется на каждой итерации двоичного поиска. Условие на шагах 20-21 служит для того, чтобы таблицы состояний содержали успешно построенный план по окончании поиска. Шаги 22-30 представляют собой алгоритм восстановления оптимального плана.

Количество итераций двоичного поиска не превосходит  $\log(T / \varepsilon) + 1$ . Количество итераций основного цикла динамического программирования, определяемого на шаге 6, не превосходит  $2^n m (m + N)$ , где  $N = \sum_{i \in 1..n} v_i$ . При этом внутренний цикл, определяемый на шаге 11, состоит не более чем из  $N$  итераций. Таким образом, предложенный алгоритм имеет асимптотическую сложность

$$O(2^n m N (m + N) \log(T / \varepsilon)). \quad (7)$$



1.  $L = 0, R = T$ ;
2. пока  $R - L > \varepsilon$ :
3.  $T' \leftarrow (L + R) / 2$ ;
4.  $\tilde{t}_{T'}(q, S, X_k) \leftarrow \infty$  для всех  $q, S, k$ .
5.  $\tilde{t}_{T'}(1, \{\}, \mathbf{s}_1) \leftarrow u_1$ ;
6. для  $q \in 1..m$ : для  $S \in \{\}\dots\{1, \dots, n\}$ : для  $k \in 1..|X|$ :
7. если  $\tilde{t}_{T'}(q, S, X_k) = \infty$ : перейти к следующей итерации;
8. если  $q < m$ :
9.  $\tilde{t}_{T'}(q+1, \{\}, X_{q+1}) = u_{q+1}$ ;
10.  $F(q+1, \{\}, X_{q+1}) = k$ ;
11. для  $i_2 \in \bar{S}$ : для  $j_2 \in 1..v_{i_2}$ :
12.  $price \leftarrow \tilde{t}_{T'}(q, S, X_k) + d(X_k, \mathbf{a}_{i_2, j_2}) + l_{i_2, j_2, q}$ ;
13. если  $price < \min(T', \tilde{t}_{T'}(q+1, S \cup \{i_2\}, \mathbf{b}_{i_2, j_2}))$ :
14.  $\tilde{t}_{T'}(q+1, S \cup \{i_2\}, \mathbf{b}_{i_2, j_2}) \leftarrow price$ ;
15.  $F(q+1, S \cup \{i_2\}, \mathbf{b}_{i_2, j_2}) \leftarrow k$ ;
16. если  $\min_k \tilde{t}_{T'}(m, \{1, \dots, n\}, X_k) \leq T'$ :
17.  $R \leftarrow T'$ ;
18. иначе:
19.  $L \leftarrow T'$ ;
20. если  $R - L \leq \varepsilon$ :
21.  $R \leftarrow 2R - L$ ;
22.  $q \leftarrow m; S \leftarrow \{1, \dots, n\}; k \leftarrow \arg \min_k \tilde{t}_{T'}(m, \{1, \dots, n\}, X_k) \leq T'$ ;
23. пока  $q \geq 1$  или  $|S| > 0$ :
24. если  $k > m$ :
25. добавить в начало плана АНПА  $q$  задание, соотв.  $X_k$ ;
26.  $q' \leftarrow q; S' \leftarrow S \setminus \{\text{задание, соотв. } X_k\}$ ;

27.	<i>иначе:</i>
28.	$q' \leftarrow q - 1; S' \leftarrow S;$
29.	$k' \leftarrow R(q, S, k);$
30.	$q \leftarrow q'; S \leftarrow S'; k \leftarrow k';$

Рис. 1. Модифицированный алгоритм Хельда-Карпа.

### 2.2.2. Эвристический алгоритм на основе аукционного метода

Рассмотрим алгоритм нахождения оптимального плана, моделирующий действие аукционного метода, применяемого в мультиагентном подходе. Все имеющиеся задания упорядочиваются. Каждое очередное задание во всех вариантах выполнения добавляется к уже существующему частичному плану каждого аппарата. Аппарат, имеющий минимальную стоимость частичного плана после вставки нового задания, объявляется выигравшим «аукцион» и задание назначается ему. Таким образом, для каждого задания перебирается:

- аппарат, которому следует назначить задание;
- позиция нового задания в текущем плане аппарата;
- вариант выполнения задания, который следует применить.

Из всех возможных позиций вставки нового задания в уже существующие планы выбирается тот, который минимизирует стоимость плана аппарата, которому назначено это задание.

Изложенный алгоритм представлен на рис. 2. Алгоритм является полиномиальным по сложности и эвристическим. Вычисление новой стоимости плана на шаге 8 может быть произведено за время  $O(1)$ , поскольку получается простым пересчётом из стоимости уже существующего плана. Циклы шагов 5 и 6 дают не более  $n + t$  итераций, в то время как циклы шагов 3 и 7 дают множитель  $N$ . Шаг 11 не влияет на асимптотику, поскольку требует  $O(n)$  шагов. Таким образом, асимптотическая сложность алгоритма есть  $O(N(n + t))$ .

Эффективность изложенного алгоритма может быть повышена с сохранением полиномиального времени работы. В изложенном алгоритме предполагается, что при вычислении стоимости нового плана на шаге 8, варианты

выполнения каждого задания жёстко фиксированы. Однако, изменение используемых вариантов заданий, даже без изменения порядка их выполнения, может давать план с меньшим временем выполнения. Построим алгоритм на основе метода динамического программирования, который позволяет по заданным  $i_1, i_2, \dots, i_{|p|}$  найти набор  $j_1, j_2, \dots, j_{|p|}$  для составления оптимального плана аппарата  $p = (i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_{|p|}, j_{|p|})$ . Такой алгоритм может быть использован для улучшения плана, найденного с использованием любого приближённого метода.

1. для  $q \in 1..m$ :
2.  $p_q \leftarrow ()$ ;
3. для  $i \in 1..n$ :
4.  $T_1 \leftarrow \infty$ ;
5. для  $q \in 1..m$ :
6. для  $k \in 1..|p_q|+1$ :
7. для  $j \in 1..v_i$ :
8.  $T \leftarrow$  стоимость плана  $p_q$  после вставки варианта  $j$  задания  $i$  в позицию  $k$ .
9. если  $T < T_1$ :
10.  $T_1 \leftarrow T; q_1 \leftarrow q; k_1 \leftarrow k; j_1 \leftarrow j$ ;
11. вставить вариант  $j_1$  задания  $i$  в позицию  $k_1$  плана  $p_{q_1}$ ;

Рис. 2. Алгоритм на основе аукционного метода.

Обозначим за  $\hat{t}_q(k, j)$  минимальное время выполнения  $q$ -ым аппаратом заданий  $i_1, i_2, \dots, i_k$  при условии  $j_k = j$ . Для первого задания в плане известно, что

$$\hat{t}_q(1, j) = u_q + d_q(\mathbf{s}_q, \mathbf{a}_{i_1, j}) + l_{i_1, j, q}, \quad (8)$$

для  $j \in 1..v_{i_1}$ . При этом справедливо правило перехода:

$$\hat{t}_q(k, j) = \min_{j'} (\hat{t}_q(k-1, j') + d_q(\mathbf{b}_{i_{k-1}, j'}, \mathbf{a}_{i_k, j}) + l_{i_k, j, q}), \quad (9)$$

для  $k > 1$ ,  $j \in 1..v_{i_k}$ . Последовательно вычисляя  $\hat{t}_q(k, j)$  для всех  $k$ , получаем оптимальное время плана аппарата как минимальное  $\hat{t}_q(|p|, j)$  по всем  $j \in 1..v_{i_{|p|}}$ . Сам оптимальный план может быть восстановлен по значениям аргументов, на которых достигается минимум выражения (9). Таким образом, асимптотическая сложность алгоритма нахождения локально-оптимального плана для одного аппарата может быть оценена как  $O(n\tilde{N}^2)$ , где  $\tilde{N} = \max_{i \in 1..n} v_i$ .

### 2.3. Дополнительные факторы модели

К дополнительным факторам, которые не рассмотрены в настоящей модели, но тем не менее могут быть учтены, относятся:

- Необходимость возвращения в фиксированную точку после выполнения миссии. Данный фактор учитывается добавлением ещё одного слагаемого в выражении (1).
- Остаток батареи каждого АНПА. Данный фактор может быть учтён введением дополнительного ограничения для каждого плана. Ещё один вопрос, связанный с энергопотреблением – выбор между скоростью выполнения задания и эффективным расходом батареи. Для обеспечения такого выбора, следует рассмотреть целевой функционал, учитывающий не только время выполнения миссии в целом, но и затраченную энергию. Альтернативный подход заключается в том, чтобы для каждого задания явно указывать скорость, с которой АНПА необходимо двигаться, а в переходах между заданиями регулировать скорость АНПА на оптимальном по энергопотреблению уровне.
- Различие в бортовом оборудовании аппаратов может быть учтено введением матрицы назначений  $B$ , где  $B_{q,i}$  равно либо 0, либо 1 в зависимости от того, может ли задание  $q$  быть выполнено аппаратом  $i$ . Учёт ограничений данного вида не требует существенной модификации изложенных алгоритмов.
- Влияние динамики АНПА на время выполнения заданий. При достаточно протяжённых траекториях данным фактором можно пренебречь. К примеру,

при выполнении галса длиной 1000 м на типичной скорости 1 м/с, время поворота АНПА на  $90^\circ$ , приблизительно равное 10 с., составляет лишь 1% от общего времени выполнения задания. Однако данный фактор становится более существенным при выполнении более коротких траекторий. Тем не менее, изложенная постановка задачи уже допускает учёт эффектов, связанных с динамикой движения АНПА. Для этого достаточно рассматривать  $\mathbf{a}_{i,j}$ ,  $\mathbf{b}_{i,j}$ ,  $\mathbf{s}_q$  не как точки трёхмерного пространства, а как векторы состояния АНПА, включающие, например, его курс. В таком случае, для вычисления стоимости переходов и времени выполнения каждого задания, следует использовать динамическую модель АНПА, вычисляя с её помощью ответы на запросы вида «сколько времени необходимо для перехода из состояния  $\mathbf{a}$  в состояние  $\mathbf{b}$ ?».

- Необходимость построения плана, при котором, для некоторого аппарата с номером  $q$ , интервал его доступности  $u_q$  превышает стоимость планов других АНПА в оптимальном решении. В таком случае, существующая постановка задачи (3) не проводит различия между планами, стоимость которых не превышает  $u_q$ . В данной ситуации целесообразно исключить аппарат  $q$  из рассмотрения при решении задачи планирования.

## 2.4. Выводы

В главе предложена математическая модель задачи планирования в группе АНПА. Модель предполагает разбиение общего задания на набор неделимых заданий и позволяет учитывать положения аппаратов и различные способы выполнения неделимых заданий. В отличие от существующих подобных моделей, задания не представляются точками, которые следует посетить. Вместо этого, каждый вариант задания характеризуется точкой старта, точкой финиша и временем выполнения.

Основной задачей в рамках модели является составление оптимального плана для группы аппаратов. При этом моделью допускается не только составление первоначального плана, но и перепланирование на различных этапах групповой операции. Выяснено, что предложенная задача является обобщением

задачи коммивояжёра. Разработаны точный и приближённый алгоритмы составления оптимального плана. Точный алгоритм представляет собой модификацию алгоритма Хедльда-Карпа. Приближённый алгоритм основан на работе аукционного метода.

Разработан алгоритм, позволяющий при фиксированной последовательности выполнения заданий одним АНПА, выбрать оптимальный вариант выполнения каждого задания за полиномиальное время.

Показано, как в рамках предложенной модели может быть произведён учёт различных дополнительных факторов.

## **ГЛАВА 3. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРА ВОДНОЙ СРЕДЫ С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ГРУППУ АНПА**

В главе рассмотрена задача измерения с требуемой точностью указанных параметров водной среды на основе использования группы АНПА с целью последующего картографирования в пределах заданной области. Описан метод планирования работы группы АНПА при решении указанной задачи. Рассмотрен вопрос о перепланировании действий группы по мере выполнения задания отдельными АНПА. Приведены результаты имитационного моделирования. Предложенный метод, в отличие от существующих, гарантирует покрытие всей области без пропусков и обеспечивает более детальное обследование участков, на которых измеренный параметр более изменчив, оптимизируя тем самым время выполнения всей миссии.

Предлагается подход к измерению заданного поля с использованием группы АНПА, работающий на основе следующих предположений:

- рассматривается двумерная задача измерения поля в плоскости заданной глубины;
- в области прямоугольной формы задано поле, различные участки которого характеризуются различными статистическими характеристиками;
- для съемки используется группа АНПА, при этом возможно изменение числа АНПА в произвольный момент времени в процессе выполнения задания;
- каждый АНПА оснащен датчиком, измеряющим поле вдоль траектории движения с требуемыми точностью и частотой, системой акустической и радиосвязи, а также навигационной системой, обеспечивающей определение местоположения подводных аппаратов с необходимой точностью.

### **3.1. Формирование траектории обследования**

Измерение заданного поля в области прямоугольной формы с использованием одиночного АНПА чаще всего осуществляется с помощью

траектории типа меандр, которая позволяет достаточно просто организовать съемку в заданной области с минимальным количеством перекрытий. Она представляет собой набор длинных параллельных между собой галсов, соединенных короткими перпендикулярными галсами. Шагом меандра является расстояние между длинными параллельными галсами. При использовании такой траектории аппарат большую часть времени перемещается по прямолинейной траектории и выполняет измерения вблизи некоторой регулярной сетки, что позволяет использовать широкий спектр алгоритмов интерполяции для картографирования полученных данных. При движении постоянным меандром шаг подбирается перед началом операции на основе априорной информации таким образом, чтобы на основе полученных измерений можно было восстановить поле с требуемой точностью.

Из требования измерения поля с заданной точностью, оптимизируя время, вытекает необходимость более информативные области, в которых измеряемый параметр изменяется значительно сильнее, обследовать более частым покрытием, а менее информативные – более редким покрытием. Для этого предложено использовать траекторию типа меандр с переменным шагом, который предлагается формировать в соответствии с текущей характеристикой информативности поля. Задача при этом заключается в необходимости планирования движения таким образом, чтобы с одной стороны исключить возможность пропуска отдельных участков, а с другой стороны – минимизировать области перекрытий.

Для решения данной задачи разработан рекурсивный алгоритм, позволяющий формировать для каждого АНПА траекторию движения типа меандр с переменным шагом, который с одной стороны позволяет минимизировать область перекрытий при смене шага меандра, а с другой – обеспечивает съемку без пробелов.

Предлагаемый алгоритм относит каждую точку поля, в которой произведено измерение, к одному из  $k$  классов в зависимости от стат. характеристик ее локальной окрестности. При обходе области класса  $i$



обеспечивается расстояние  $h_i$  (шаг) между галсами при проходе по ней. При этом шаги связаны между собой соотношением:  $h_{i+1} = qh_i$ .

На рис. 3 показана используемая траектория типа меандр с переменным шагом. АНПА начинает съемку заданного участка обычным меандром с максимальным шагом  $h_1$  (галсы  $A$ ,  $B$  и  $C$ ). Если в процессе съемки (галс  $B$ ) будет обнаружен более изменчивый участок поля (класс 2), то следует организовать более частое обследование и выполнить маневр  $B1-B5$ . При этом расстояние между галсами  $B2$  и  $B4$  составляет  $2h_2$ , однако, с учетом уже выполненного галса  $B$ , обеспечивается необходимое расстояние  $h_2$  между галсами в области класса 2. В процессе выполнения маневра  $B1-B5$  может возникнуть необходимость в еще более детальной съемке (область класса 3), которая реализуется аналогично меандром с шагом  $h_3$  (галсы  $B41-B45$ ) и так далее.

Для определения константы  $q$  рассмотрим ситуацию, в которой область, состоящая из точек класса  $k$ , пересекает два соседних параллельных галса первоначального меандра (например,  $A$  и  $B$  на рис. 3). В соответствии с алгоритмом, вдоль этих галсов будут совершены дополнительные маневры для классов 2, 3, ...,  $k$ . Таким образом, вдоль  $B$  будут следовать параллельно ему дополнительные галсы, подобно  $B4$  и  $B44$  на рис. 3. Самый дальний галс будет отстоять от  $B$  на расстояние  $L = h_2 + \dots + h_k$ , то есть  $L = h_1(q + \dots + q^{k-1})$ . Аналогично, параллельно галсу  $A$  будут располагаться галсы, самый дальний из которых будет отстоять на то же расстояние  $L$  от него. Для полного покрытия необходимо обеспечить расстояние  $h_k$  между двумя наиболее удаленными галсами (один от  $A$ , другой – от  $B$ ). Таким образом, необходимо, чтобы выполнялось соотношение  $h_1 - 2L = h_k$ , т.е. имеем уравнение:

$$h_1 - 2h_1(q + \dots + q^{k-1}) = h_1q^{k-1}, \quad (10)$$

откуда следует, что  $q = 1 / 3$ .

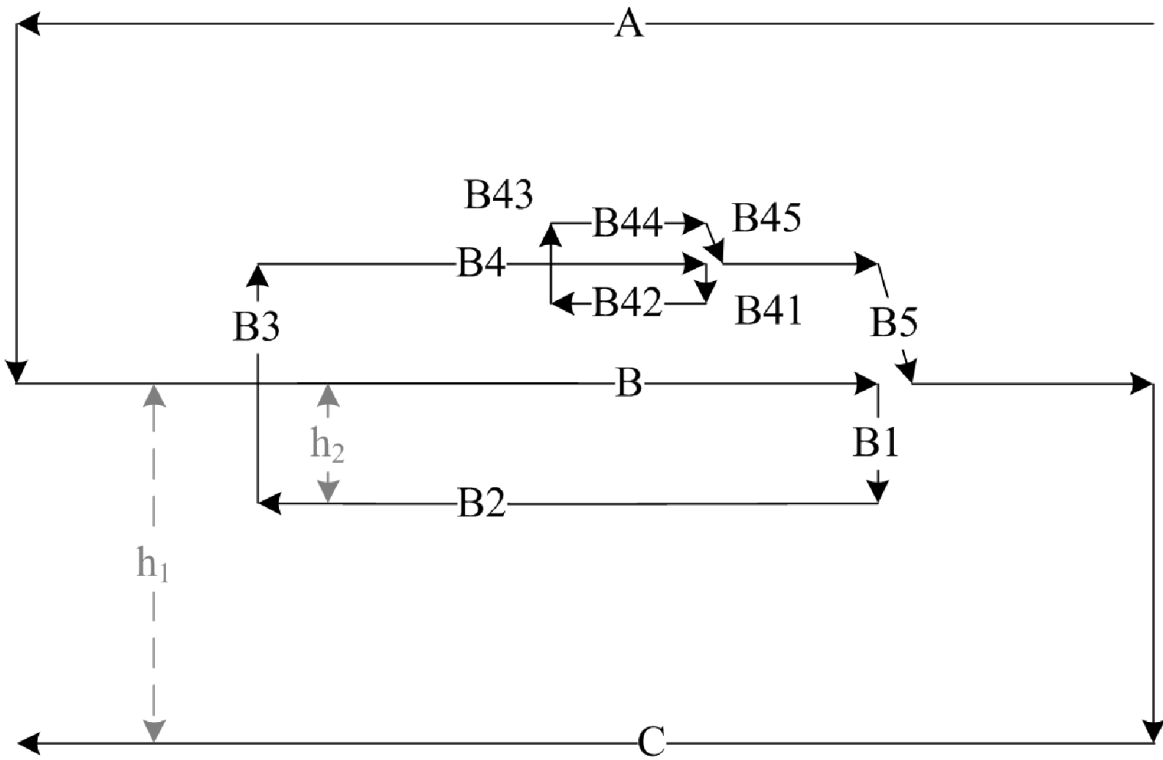


Рис. 3. Траектория движения типа меандр с переменным шагом для АНПА.

На вход алгоритма поступает отрезок для обследования (**ab** – очередной галс или фрагмент галса), параметры метода и параметры рекурсии. Сокращение времени операции по сравнению с обыкновенной реализацией достигается за счёт дополнительного обследования «на месте». В случае если по ходу движения АНПА встречается отрезок  $x_{i,1}x_{i,2}$  на котором следует организовать дополнительное обследование, то на расстоянии  $H$  от его окончания осуществляется рекурсивный вызов процедуры обхода с меньшим значением  $h$  (см. рис. 4 и рис. 5).

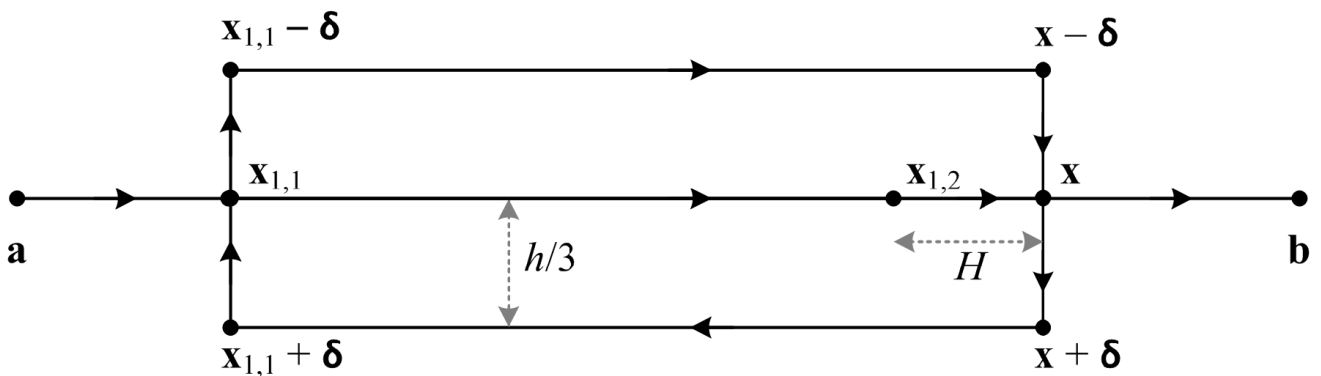


Рис. 4. Формирование траектории при рекурсивном вызове.

Меандр с переменным шагом ( $\mathbf{a}, \mathbf{b}, h, H, \varepsilon, R, R_1$ )

1. установить путевую точку АНПА  $\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{a}$ ;
2. дождаться выхода АНПА в точку  $\mathbf{w}$ ;
3. для  $i \in R_1..R$ :
4.      $\mathbf{x}_{i,1} \leftarrow \mathbf{x}_{i,2} \leftarrow \mathbf{0}$ ;
5. установить путевую точку АНПА  $\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{b}$ ;
6. дождаться очередного измерения параметра  $Z$ ;
7.  $\mathbf{x} \leftarrow$  текущее положение АНПА;
8. если  $\mathbf{w}$  достигнута и  $\mathbf{x}_{i,1} = \mathbf{0}$  для всех  $i \in R_1..R$ :
9.     завершить;
10. для  $i \in R_1..R-1$ :
11.     если точность  $\varepsilon$  не достигается для  $\mathbf{y}$  на расстоянии  $h / (2 \cdot 3^{i-1})$  от  $\mathbf{x}$
12.     или  $\mathbf{w}$  достигнута и  $\mathbf{x}_{i,1} \neq \mathbf{0}$ :
13.          $\mathbf{x}_{i,2} \leftarrow \mathbf{x}$ ;
14.         если  $\mathbf{x}_{i,1} = \mathbf{0}$ :
15.              $\mathbf{x}_{i,1} \leftarrow \mathbf{x}$ ;
16.         если  $|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{i,2}| > H / 3^i$ :
17.              $\delta \leftarrow$  вектор длины  $h / 3^i$ , перпендикулярный  $\mathbf{x}_{i,2} - \mathbf{x}_{i,1}$ ;
18.             Меандр с переменным шагом( $\mathbf{x} + \delta, \mathbf{x}_{i,1} + \delta, h/3, H, \varepsilon, R, i$ );
19.             Меандр с переменным шагом ( $\mathbf{x}_{i,1} - \delta, \mathbf{x} - \delta, h/3, H, \varepsilon, R, i$ );
20.             установить путевую точку АНПА  $\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{x}$ ;
21.             дождаться выхода АНПА в точку  $\mathbf{w}$ ;
22.              $\mathbf{x}_{i,1} \leftarrow \mathbf{x}_{i,2} \leftarrow \mathbf{0}$ ;
23. перейти к шагу 5;

Рис. 5. Алгоритм «Меандр с переменным шагом».

### 3.2. Критерии смены шага меандра

Для принятия решения об изменении шага меандра предположим, что измеряемое поле  $Z$  является реализацией случайного процесса. Такой подход применяется в геостатистике [10]. Если характеристики случайного процесса

одинаковы во всей рассматриваемой области, то он является стационарным. В нашем случае предположение о различных статистических характеристиках  $Z$  на различных участках означает, что процесс не является стационарным. Таким образом, с одной стороны, при формировании критерия следует использовать измерения, произведённые в точках траектории, максимально близко расположенных к текущей. С другой стороны, меньшая выборка обеспечивает меньшую точность в оценке характеристик случайного процесса. Для формирования выборки рассмотрим работу алгоритма, изложенного выше. При движении АНПА вдоль отрезка сформированной траектории, наиболее близкие точки, в которых были произведены измерения – это последний участок траектории. Рассмотрим выборку из некоторого количества последних проделанных измерений. Необходимо сформировать критерий, позволяющий отнести текущую точку  $\mathbf{x}$  к одному из классов. Для этого необходимо на основе имеющейся выборки оценить величину ошибки, которая будет допущена после интерполяции в точках между галсами. Будем оценивать ошибку в точке  $\mathbf{y}$ , равноудалённой от двух соседних галсов, т.е.

$$|\mathbf{x} - \mathbf{y}| = \frac{h}{2 \cdot 3^{i-1}}. \quad (11)$$

*Критерий 1.* Обозначим рассматриваемый случайный процесс за  $Z$ , а результат измерения в точке  $\mathbf{x}$  за  $z_x$ . Если существуют и известны плотности распределения  $f$  (в том числе и совместные) в каждой точке рассматриваемой области, то ошибка может быть оценена на основе условного распределения  $Z(\mathbf{y}) | Z(\mathbf{x}) = z_x$ :

$$f_{Z(\mathbf{y})|Z(\mathbf{x})=z_x}(\lambda) = \frac{f_{Z(\mathbf{y}),Z(\mathbf{x})}(\lambda, z_x)}{f_{Z(\mathbf{x})}(z_x)}. \quad (12)$$

Теперь, если при интерполяции используется значение  $z_y$  для аппроксимации исследуемого параметра в точке  $\mathbf{y}$ , то вероятность совершить ошибку более чем на  $\varepsilon$  определяется выражением:

$$P\{|Z(\mathbf{y}) - z_y| > \varepsilon\} = 1 - \int_{z_y - \varepsilon}^{z_y + \varepsilon} f_{Z(\mathbf{y})|Z(\mathbf{x})=z_x}(\lambda) d\lambda. \quad (13)$$

К примеру, если известно, что  $Z$  – стационарный гауссов процесс со средним  $\mu$  и изотропной ковариационной функцией  $K$ , то имеем (см. [93]):

$$Z(\mathbf{y}) | Z(\mathbf{x}) = z_x \sim N\left(\mu + \frac{K(h/(2 \cdot 3^{i-1}))}{K(0)}(z_x - \mu), K(0) - \frac{K(h/(2 \cdot 3^{i-1}))^2}{K(0)}\right). \quad (14)$$

Изложенные выше рассуждения приводят к следующему критерию необходимости дополнительного обследования вблизи точки  $\mathbf{x}$ :

1. На основе  $M$  последних измерений  $z_1, z_2, \dots, z_M$ , произведённых в точках  $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(M)}$  оценить выборочное среднее  $\bar{z}$  и корреляционную функцию процесса вблизи точки  $\mathbf{x}$ :

$$\hat{K}(k) = \text{среднее}[(z_j - \bar{z})(z_{j+k} - \bar{z}) \text{ при } k \leq |\mathbf{x}^{(j)} - \mathbf{x}^{(j+k)}| < k+1], \quad (15)$$

2. На основе выражений (13) и (14) оценить вероятность того, что  $Z(\mathbf{y})$  отклонится от среднего более чем на  $\varepsilon$ . При этом вместо  $\mu$  и  $K$  использовать  $\bar{z}$  и  $\hat{K}$  соответственно.
3. В случае если вычисленная вероятность превышает порог  $r$ , произвести обследование на уровне  $i$ .

*Критерий 2.* В случае если гауссова модель не применима к исследуемому параметру, может быть использован критерий на основе вариограммы (критерий 2). В предположении, что рассматриваемый процесс стационарен вблизи  $\mathbf{x}$ , имеем (см. [10]):

$$\gamma(|\mathbf{x} - \mathbf{y}|) = \frac{1}{2} E[(Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{y}))^2] = K(0) - K(|\mathbf{x} - \mathbf{y}|). \quad (16)$$

В качестве критерия необходимости дополнительного обследования уровня  $i$  рассмотрим следующее условие:

$$\sqrt{E[(Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{y}))^2]} > \varepsilon, \quad (17)$$

или с учётом (16) и (11):

$$\sqrt{2[\hat{K}(0) - \hat{K}\left(\left[\frac{h}{2 \cdot 3^{i-1}}\right]\right)]} > \varepsilon. \quad (18)$$

Критерий 2, в отличие от критерия 1 не использует дополнительных предположений о распределении величин  $Z$ , и поэтому не даёт оценок вероятности, с которой будет соблюдена точность.

Сформулированные выше критерии могут быть использованы не только в рамках настоящего метода, но и для вычисления оптимального шага обыкновенного меандра на основе заданной точности.

### 3.3. Результаты моделирования

С целью исследования предложенного метода был проведён ряд вычислительных экспериментов.

Использовались искусственно сгенерированные данные, которые были получены с использованием модификации алгоритма последовательного гауссова стохастического моделирования (см. разд. 5.1.2 и рис. 6).

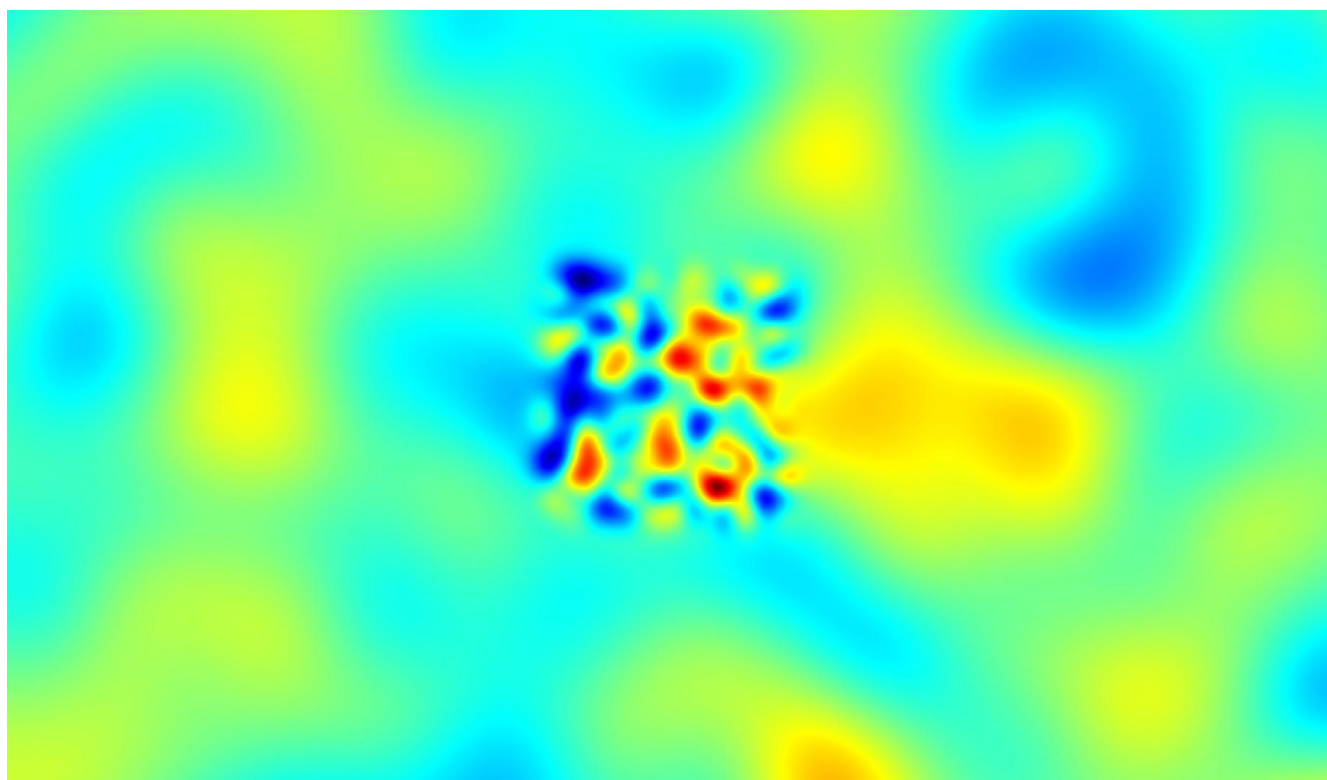


Рис. 6. Пример искусственно сгенерированных данных, использованных в вычислительных экспериментах.

Данные заданы на равномерной прямоугольной сетке размером  $1200 \times 700$ . Расстояния измеряются в шагах сетки. Основная часть сгенерированного скалярного поля представляет собой реализацию гауссова процесса с

ковариационной функцией  $K(h) = \exp(-h^2/100^2)$ . Однако, в центре поля, в квадрате размером  $200 \times 200$  сгенерированы данные с ковариационной функцией  $K(h) = \exp(-h^2/20^2)$ . Итоговое поле получено как сумма двух сгенерированных полей (см. разд. 5.1.2). Таким образом, искусственно сгенерировано поле, имеющее различные статистические характеристики на различных участках. Исследуемый параметр среды принимает значения из отрезка  $[-5,54; 6,04]$ .

Производилось сравнение предложенного алгоритма формирования траектории с обычновенным меандром по методике, основанной на имитационном моделировании:

1. С помощью меандра с переменным шагом получить траекторию  $T_1$ , измерить её длину  $L(T_1)$ .
2. Получить траекторию  $T_2$  на основе обычного меандра с минимальным шагом, при котором  $L(T_2) > L(T_1)$ .
3. Получить оценку  $Z_1$  и  $Z_2$  интерполяцией значений  $Z$  с данными в точках  $T_1$  и  $T_2$  соответственно. Использовать кусочно-линейную интерполяцию.
4. Сравнить распределения  $Z - Z_1$  и  $Z - Z_2$ .

Результаты наиболее показательных экспериментов собраны в таблице 1. В экспериментах №1–3 шаг базового меандра составлял 87 шагов сетки, в эксперименте №4 – 70 шагов.

В эксперименте №1 использовался «идеальный критерий»: решение о необходимости дополнительного обследования уровня  $i$  принималось исходя из значений в ячейках сетки на расстоянии от 1 ячейки до  $h / (2 \cdot 3^{i-1})$ , расположенных на прямой, перпендикулярной галсу. Использовалось значение  $\varepsilon = 0,5$ . При этом ошибка восстановления параметра находится в диапазоне  $[-\varepsilon; \varepsilon]$  за исключением нескольких узлов сетки (общее количество которых составляет 0,0067% от общего числа узлов), в которых величина ошибки превысила заданный порог из-за различия между предполагаемым и действительным расстоянием между траекториями.

Детальная информация о распределении ошибок представлена на логарифмической гистограмме на рис. 7а. На данной гистограмме представлены

две выборки. Количество элементов в каждой выборке равно количеству узлов сетки. Первая выборка образована значениями  $Z - Z_1$  и обозначена кодом «МПШ». Она представляет собой ошибки восстановления поля в узлах сетки, исходя из известных значений вдоль траектории меандра с переменным шагом. Аналогично, вторая выборка обозначена кодом «ОМ» и образована значениями  $Z - Z_2$ . Из гистограммы видно, что меандр с переменным шагом, построенный по «идеальному критерию», приводит к ошибкам восстановления, находящимся в заданных пределах. В то же время, обыкновенный меандр такой же длины имеет разброс ошибки от -4 до 5, однако количество узлов сетки с ошибкой восстановления, близкой к нулю, также больше. Можно сказать, что необходимая точность обследования у меандра с переменным шагом при той же длине траектории, что и у обыкновенного меандра, достигается благодаря «искривлению» гистограммы ошибок.

Эксперимент №2 иллюстрирует работу меандра с переменным шагом, использующего критерий 1 (см. раздел 3.2). Перед оценкой корреляционной функции из текущей выборки вычитался линейный тренд. Использовалось значение  $r = 0,954$  (два сигма), глубина рекурсии была ограничена числом 3. Оценка ковариационной функции аппроксимировалась гауссовой ковариационной функцией по методу наименьших квадратов. Результирующая траектория превысила по основным показателям обыкновенный меандр с такой же длиной. Доля узлов сетки с ошибкой восстановления более  $\varepsilon$  составила 3%. Соответствующая логарифмическая гистограмма ошибок представлена на рис. 7б. В данном эксперименте меандр с переменным шагом позволяет восстановить исследуемый параметр среды с ошибкой в пределах  $[-1,69; 2,06]$ , в то время как обыкновенный меандр той же длины даёт ошибку в пределах  $[-5,00; 5,49]$ . Следует отметить, что данный критерий предоставляет излишне «пессимистическую» оценку, из-за чего в экспериментах была ограничена глубина рекурсии. Это может быть обусловлено как тем, что использованная величина выборки недостаточна для необходимой точности оценки



корреляционной функции, так и тем, что данный критерий использует условную вероятность лишь для одной соседней точки.

Эксперимент №3 использует критерий 2. Соответствующая гистограмма ошибок представлена на рис. 7в. По основным показателям качество решения, полученное с использованием данного критерия аналогично полученному с использованием критерия 1, однако данный критерий не использует предположений о распределениях случайного процесса, реализацией которого является исследуемый параметр водной среды.

Длины траекторий при различных критериях необходимости дополнительного обследования лежат в диапазоне 17500–22600 (шаг сетки полагается равным единице). Минимальный шаг, использованный меандром с переменным шагом, составил 9 единиц. Это соответствует длине траектории 95500 единиц для обыкновенного меандра, что в 4,2–5,4 раз длиннее траектории, полученной с помощью предложенного алгоритма. Данный показатель изменяется от поля к полю и зависит, в том числе, от соотношения площадей областей различных классов.

Таблица 1. Результаты вычислительных экспериментов, сравнивающих меандр с переменным шагом и обыкновенный меандр.

№	Алгоритм (АМ – переменный шаг меандра, ОМ – обыкновенный меандр)	Мин. ошибки	Макс. ошибки	СКО ошибки	Длина траектории
1	АМ, $\varepsilon = 0.5$ , точный	-0,50	0,56	0,14	22552
	ОМ	-4,01	5,00	0,29	23500
2	АМ, $\varepsilon = 0.5$ , критерий 1	-1,69	2,06	0,21	17629
	ОМ	-5,00	5,49	0,36	18700
3	АМ, $\varepsilon = 0.5$ , критерий 2	-1,49	2,06	0,21	17591
	ОМ	-5,00	5,49	0,36	18700

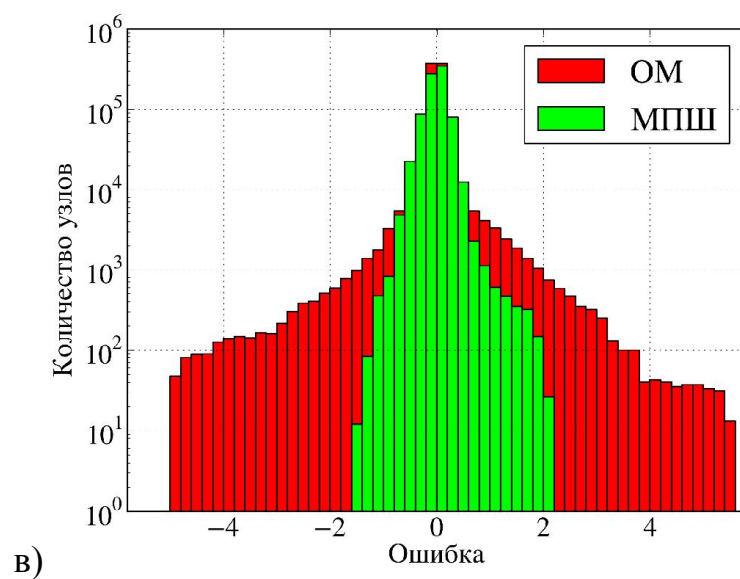
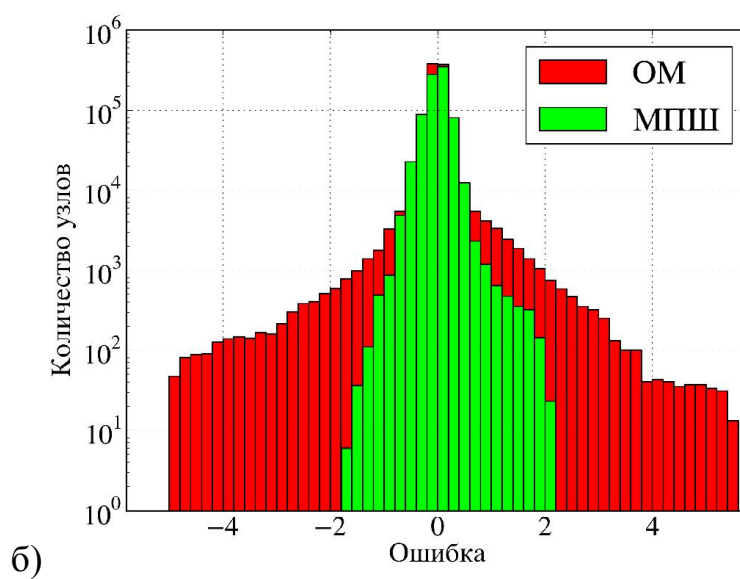
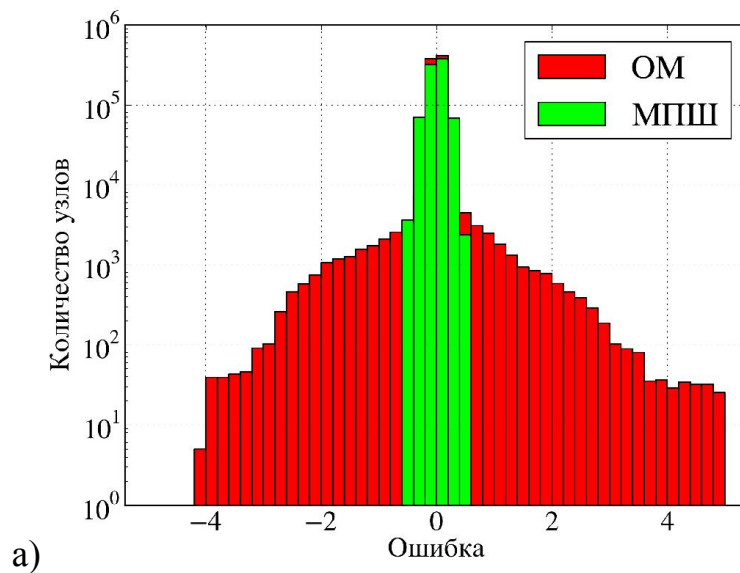


Рис. 7. Сравнение логарифмических гистограмм  $Z - Z_1$  (меандр с переменным шагом /МПШ/) и  $Z - Z_2$  (обыкновенный меандр/ОМ/): а) эксперимент №1, б) эксперимент №2, в) эксперимент №3.

### 3.4. Обеспечение групповой работы

Положим, что область обследования – это прямоугольник размером  $W$  по первой оси и  $h(n-1)$  по второй, а начало координат поместим в один из его углов. Сформулируем задания для задачи (3):

$$v_i = 2, \quad l_{i,1,q} = l_{i,2,q} = W / U_q, \quad (19)$$

$$\mathbf{a}_{i,1} = \mathbf{b}_{i,2} = (0, (i-1)h), \quad \mathbf{a}_{i,2} = \mathbf{b}_{i,1} = (W, (i-1)h).$$

Здесь  $U_q$  – оптимальная скорость движения АНПА с номером  $q$ . План с меньшей стоимостью может быть получен дроблением отрезков, соединяющих точки  $\mathbf{a}_{i,j}$  и  $\mathbf{b}_{i,j}$ . Предполагается, что  $u_q = 0$  и известны начальные положения аппаратов  $\mathbf{s}_q$ .

В соответствии с алгоритмом «меандр с переменным шагом», значения  $l_{i1}, l_{i2}$  в выражении (19) представляют собой оценку снизу для времени выполнения задания. При этом может оказаться, что один из АНПА выполнит свой план существенно раньше остальных. В этом случае предложено осуществить перепланирование: для каждого аппарата оценить время, оставшееся до выполнения текущего задания, и используя его в качестве  $u_i$  решить новую задачу (3) для тех заданий, выполнение которых ещё не началось.

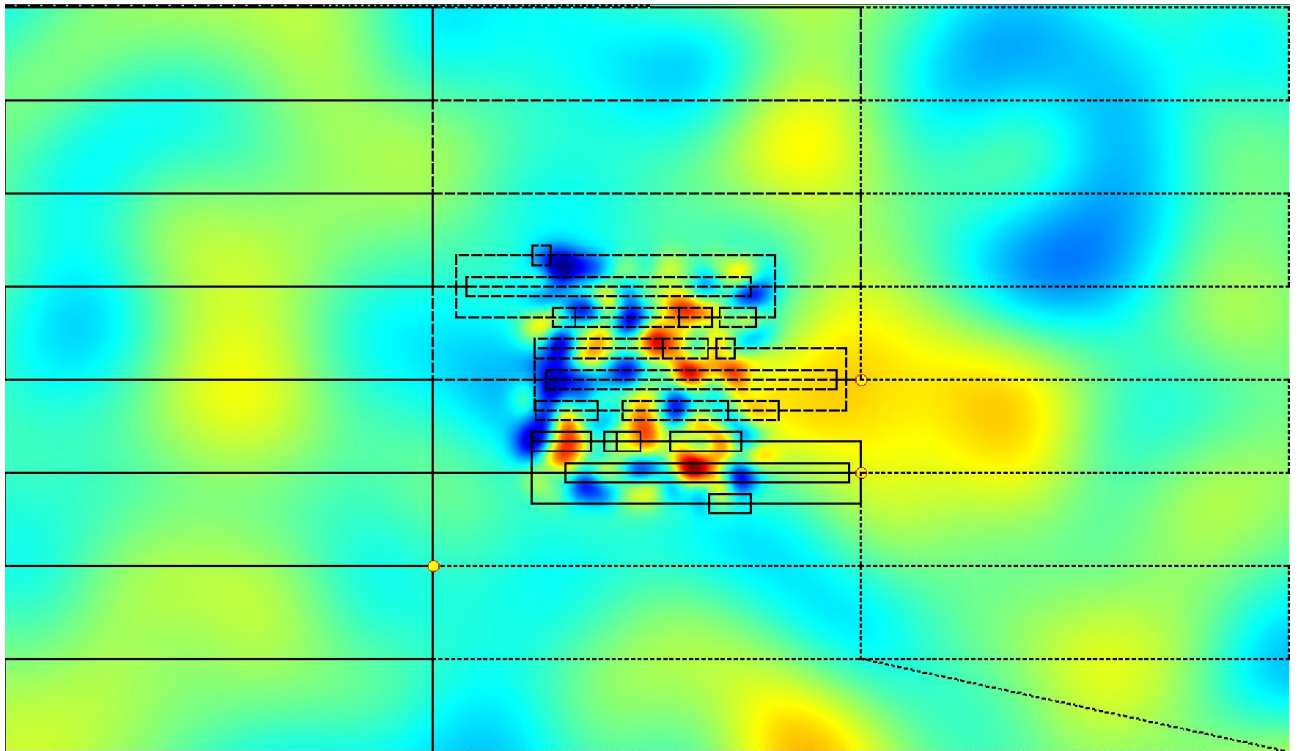


Рис. 8. Результаты работы алгоритмов в процессе съемки модельной карты на основе применения группы АНПА.

На рис. 8 приведены траектории движения группы из трех АНПА, сформированные в процессе съемки модельной карты в вычислительном эксперименте №2. Все АНПА начинают работу, находясь в верхнем левом углу заданной прямоугольной области. Траектории первого, второго и третьего АНПА отображены непрерывной, пунктирной и точечной линиями соответственно. Имеется 9 галсов, каждый из которых разделён на 3 равные части. В результате имеется 27 заданий, пронумерованных от 0 до 26 сверху вниз слева направо. Таким образом, АНПА №1 первоначально получает для обследования левую треть исследуемой области (задания 0, 3, 6, ...), АНПА №2 назначена средняя треть (задания 1, 4, 7, ...), АНПА №3 получает правую треть (задания 2, 5, 8, ...). В процессе выполнения миссии происходит перераспределение заданий.

На рис. 9 приведен автоматически сгенерированный отчет работы планировщика. Каждая из 7 изображённых диаграмм соответствует результату очередного перепланирования. Планирование осуществлялось с использованием модификации алгоритма Хельда-Карпа, описанной в разделе 2.2.1. Верхняя диаграмма отображает первоначальный план для каждого АНПА. Серыми прямоугольниками с числами показаны задания и их номера. Пробелы между заданиями соответствуют переходам. Заштрихованная область, ограниченная вертикальной пунктирной чертой изображает текущий шаг модели.

В процессе выполнения миссии раньше всех заканчивает выполнение задания первый АНПА. После этого на основе анализа времени, необходимого для завершения выполнения заданий разными подводными аппаратами, выполняется перепланирование выполнения оставшихся заданий (вторая сверху диаграмма). Из нее следует, что в результате перепланирования первому аппарату добавлены задания 16 и 19, а третьему – задание 25, которые были изъяты из списка заданий второго аппарата.

Следующее перепланирование выполняется после завершения выполнения заданий третьим аппаратом – третья сверху диаграмма. Из нее следует, что в процессе выполнения заданий 16 и 13 первым и вторым аппаратами изменилась оценка времени окончания их выполнения.

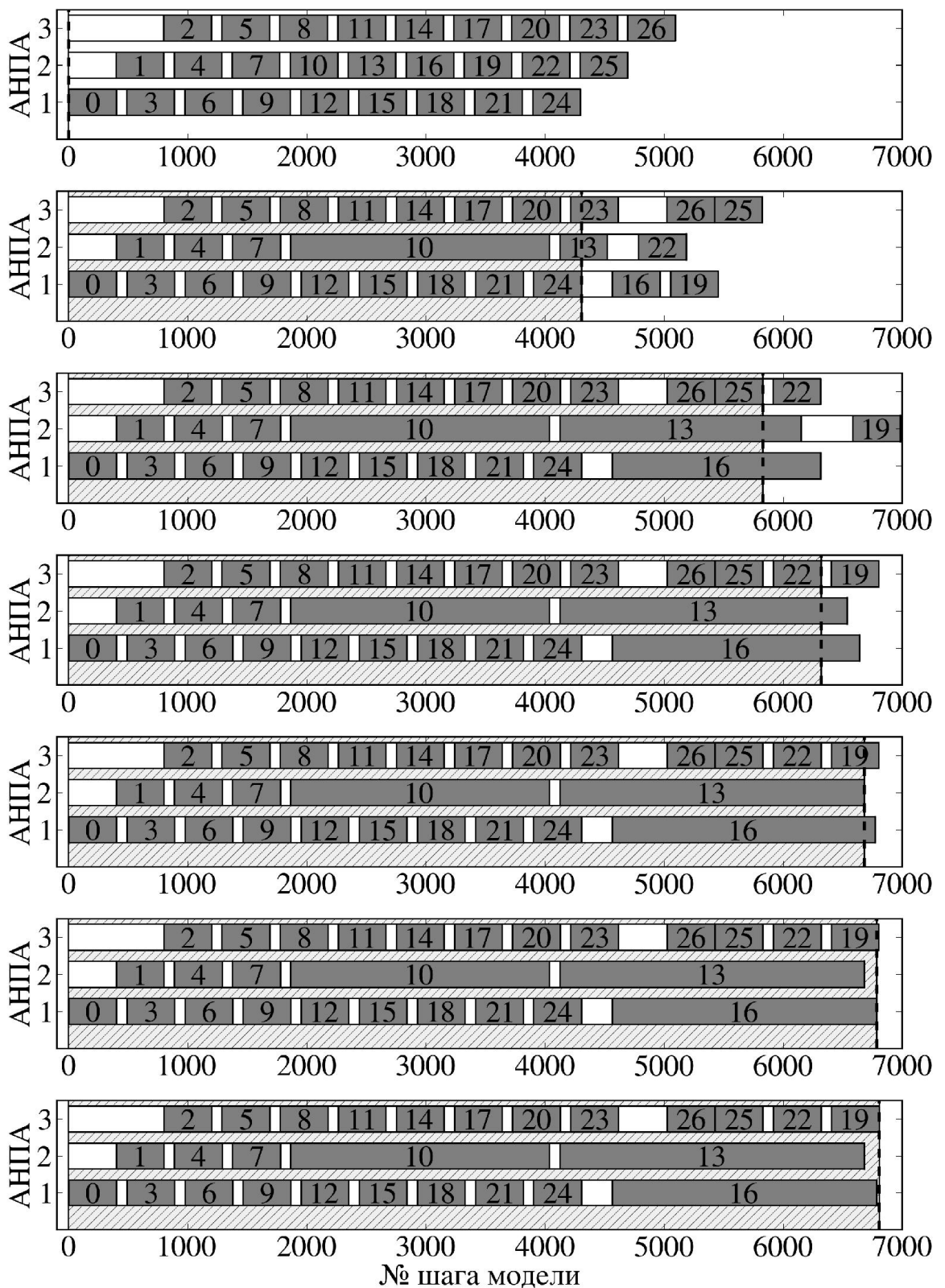


Рис. 9. Автоматически сгенерированный отчет работы планировщика в эксперименте №2.

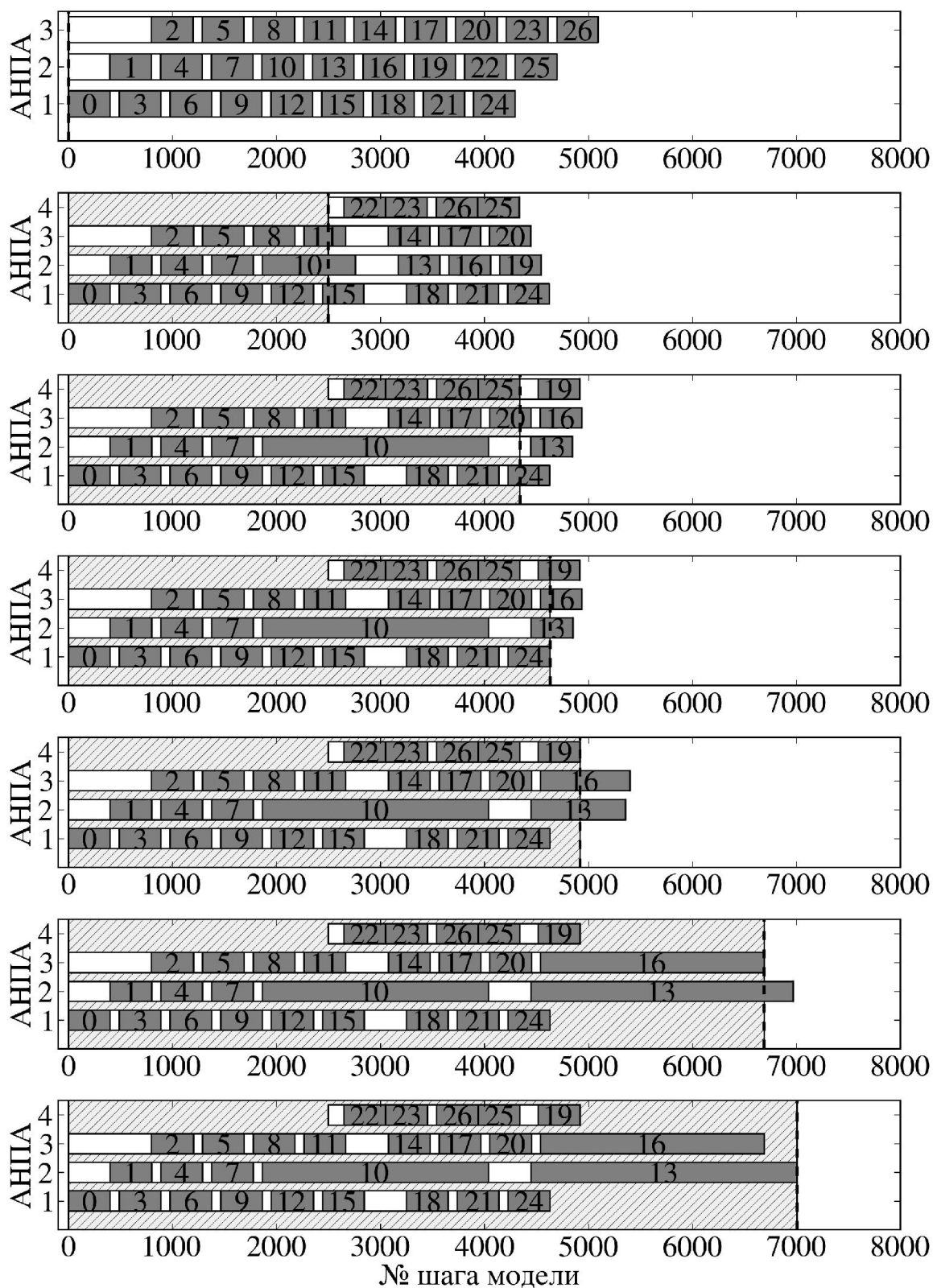


Рис. 10. Отчет работы планировщика в случае добавления в условиях эксперимента №2 одного АНПА на шаге №2500.

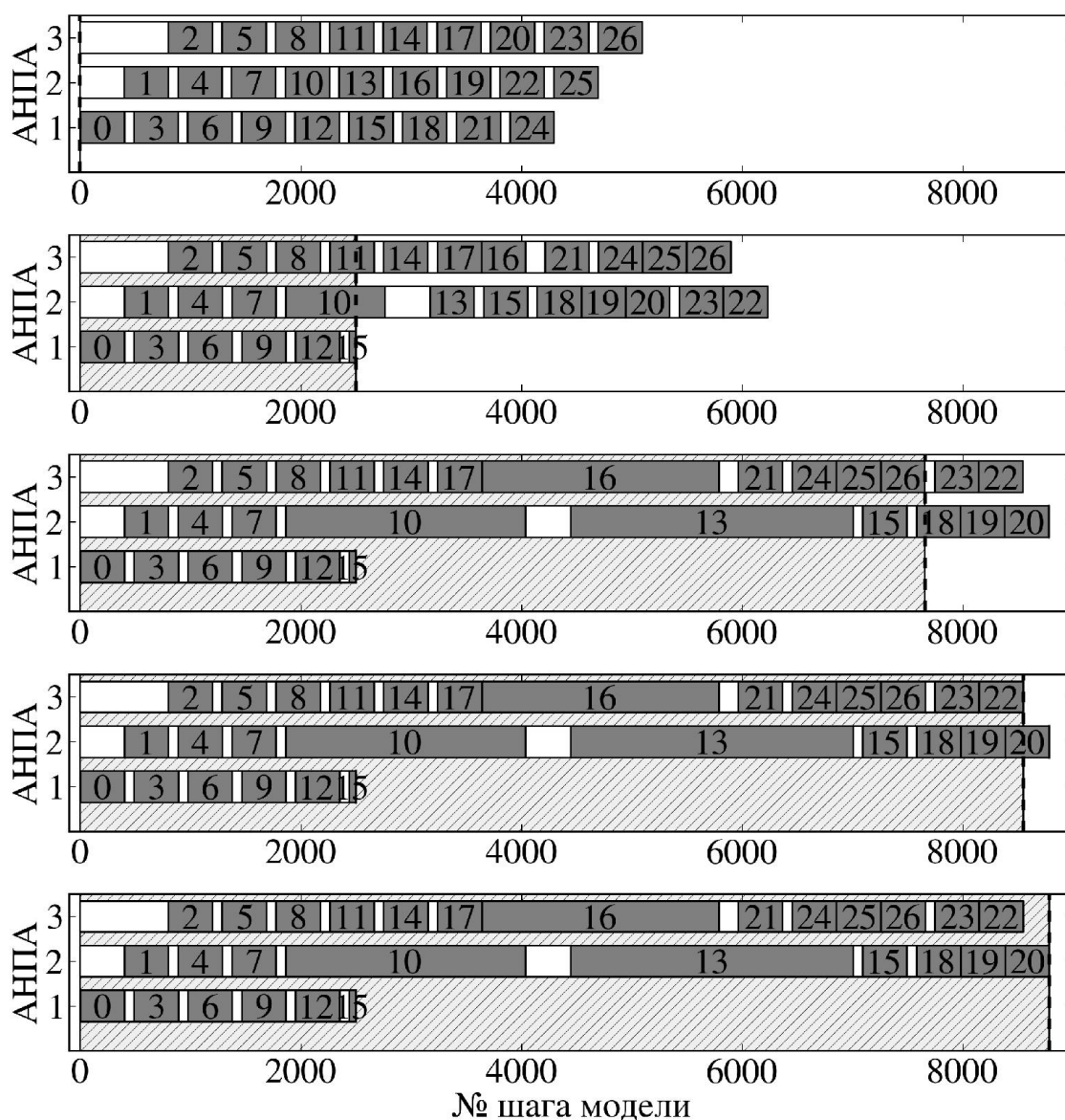


Рис. 11. Отчет работы планировщика в случае удаления в условиях эксперимента №2 АНПА №1 на шаге №2500.

В результате текущего перепланирования задания 19 и 22 первого и второго АНПА были переданы третьему аппарату. Четвертая, пятая и шестая диаграммы соответствуют моментам завершения выполнения заданий третьим, вторым и первым аппаратами. Переназначение заданий при этом не производится потому, что все задания уже выполняются.

Общее количество шагов модели составило 6941. В случае использования алгоритма планирования на основе аукционного метода, миссия завершается за 7481 шаг, что на 7,8% больше. В случае же независимой работы АНПА, когда вся область делится на одинаковые части, продолжительность миссии составила

10819 шагов, что на 55,8% больше. Это говорит об эффективности совместной работы группы.

Механизм перепланирования позволяет также реагировать на изменение состава группы. Пример этого изображён на рис. 10. Разыгрывается та же ситуация из эксперимента №2, используется модификация алгоритма Хельда-Карпа, но на шаге №2500 к группе был добавлен АНПА № 4. В процессе планирования ему были переданы задания 22, 23, 25, 26, принадлежащие до этого аппаратам №2 и №3. Видно, что, несмотря на добавление одного аппарата к группе, время окончания работ не изменилось по сравнению с рис. 9. Это произошло из-за того, что время выполнения заданий 13 и 16 первоначально было оценено снизу и позже уточнялось.

На рис. 11 представлены планы, полученные в обратной ситуации. АНПА №1 был выведен из состава группы на шаге №2500. Его задания, включая и текущее, т.е. невыполненное, задание 15 были перераспределены между оставшимися в группе аппаратами.

### **3.5. Выводы**

Разработан и исследован метод съёмки параметров водной среды с заданной точностью на основе применения группы АНПА. Разработанный подход позволяет покрывать заданную область без пропусков и использует формирование траектории типа «меандр с переменным шагом». Он позволяет повысить эффективность съёмки при изучении нестационарных процессов. Так, на искусственно сгенерированном поле, была получена траектория, в 4-5 раз более короткая, чем обыкновенный меандр, обеспечивающий такую же точность.

Предложен вариант набора неделимых элементарных заданий, которые распределяются между АНПА таким образом, чтобы минимизировать время выполнения всей миссии в целом. В методе реализована процедура перепланирования заданий в случае изменения числа работающих АНПА, что обеспечивает оптимальность планирования для группы с переменным числом аппаратов.



Показано, как группа совместно работающих аппаратов, оказывается эффективнее того же количества АНПА, работающих отдельно. В условиях вычислительного эксперимента увеличение продолжительности миссии за счёт разобщения аппаратов составило более 50%.

Использование алгоритма Хельда-Карпа при перераспределении заданий привело к более эффективному решению, чем использование аукционного метода. Однако неточная оценка времени выполнения заданий может приводить и к обратной ситуации.

Полученные результаты подтверждают работоспособность и эффективность предложенных алгоритмов планирования заданий для группы АНПА. С точки зрения группового взаимодействия, предложенный подход на основе разбиения миссии на задания позволяет обрабатывать исключительные ситуации и оптимизировать работу в целом, включая ситуации, когда изменяется количество работающих АНПА.

## **ГЛАВА 4. МЕТОД ПОИСКА И ОБСЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ГРУППУ АНПА**

В главе рассмотрена задача поиска и оценки размеров локальных неоднородностей в заданной акватории. Изложен подход, позволяющий не только локализовать, но также оценить 3D размеры локальных неоднородностей и массу содержащегося в них растворенного вещества. Описан метод планирования работы группы автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/ при решении указанной задачи. Поставлена соответствующая задача дискретной оптимизации и приводится сравнение двух алгоритмов её решения. Рассмотрен вопрос о перепланировании действий группы в случае возникновения внештатных ситуаций в процессе выполнения задания. Приведены результаты моделирования работы предложенных алгоритмов.

### **4.1. Метод обследования локальных неоднородностей**

Рассмотрим задачу обследования акватории на основе использования группы АНПА с целью выявления в ней локальных неоднородностей. Положим, что задана некоторая прямоугольная область  $A = \{(x, y): x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2\}$ , которую необходимо осмотреть с помощью группы из  $m$  подводных аппаратов на предмет наличия ЛН.

В качестве модели среды выступает трёхмерное пространство, на котором определена скалярная функция  $Z$  – параметр морской среды. Локальной неоднородностью считается область, в которой  $Z$  превышает заданное пороговое значение. К примеру,  $Z$  может иметь смысл концентрации загрязняющего вещества. Тогда объём ЛН говорит о степени его распространения, а интеграл  $Z$  по всей ЛН говорит о количестве загрязняющего вещества. Предполагается, что справедливо следующее:

- априорно задано значение глубины, на которой следует производить обследование;
- указан минимальный размер ЛН;

- имеется группа из  $m$  АНПА, каждый из которых оснащён датчиком, измеряющим рассматриваемый параметр с высокой частотой.

Предлагаемый метод обследования включает три этапа.

*Этап 1.* Предварительный осмотр «грубым» меандром. Область  $A$  разбивается на  $m$  частей в соответствии с числом имеющихся АНПА (рис. 12):

$$A_i = \left\{ (x, y) : x_1 \leq x \leq x_2, y_1 + \frac{i-1}{m}(y_2 - y_1) \leq y \leq y_1 + \frac{i}{m}(y_2 - y_1) \right\}. \quad (20)$$

Сформированные прямоугольные области распределяются между подводными аппаратами и организуется покрытие каждой области  $A_i$  горизонтальным меандром с шагом  $h$  между галсами. Данный этап может также быть реализован с использованием решения задачи (3) при заданиях вида (19). Шаг  $h$  выбирается равным половине размера минимальной области, которая может рассматриваться как ЛН.

*Этап 2.* На основе произведенных всеми подводными аппаратами измерений создается список точек пересечения границ ЛН. В данных точках траектории АНПА пересекают изолинии, соответствующие заданному порогу измеряемого параметра водной среды. На основе данного набора точек грубо формируются связные области ЛН и оценивается их количество.

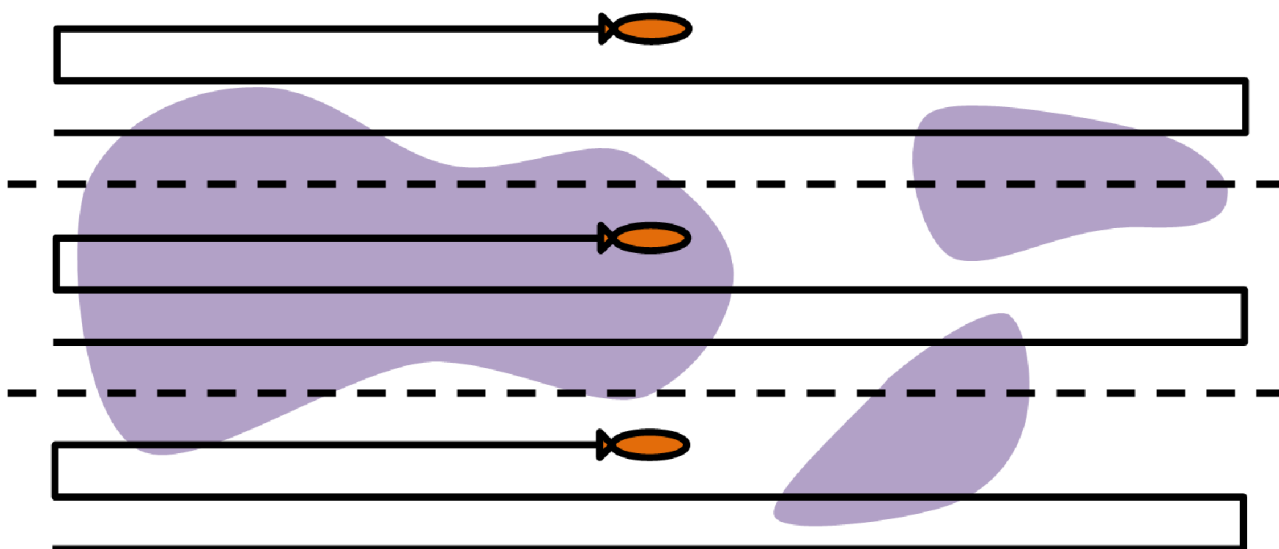


Рис. 12. Этап 1. Предварительный осмотр заданной области «грубым» меандром с помощью трех АНПА.

Используется следующий алгоритм формирования связных областей по набору параллельных сечений областей ЛН траекториями АНПА. Каждый принадлежащий области ЛН отрезок предыдущего параллельного галса меандра (верхний отрезок) сопоставляется с каждым принадлежащим области ЛН отрезком текущего параллельного галса меандра (нижний отрезок). Считается, что два отрезка принадлежат одной области, если выполнено условие  $(A_1 - B_2) \cdot (A_2 - B_1) > 0$ , где  $A_1, B_1$  и  $A_2, B_2$  – координаты левых и правых границ верхнего и нижнего отрезков. Затем строится граф  $G$ , вершинами которого являются отрезки, а рёбра проведены между теми парами вершин, отрезки которых принадлежат одной области по критерию, описанному выше. Далее, производится поиск компонент связности указанного графа. Каждой компоненте связности ставится в соответствие одна ЛН, а выпуклая оболочка отрезков соответствующих ей вершин рассматривается как аппроксимация её формы. На рис. 13 приведена визуализация результатов после первых двух шагов работы группового алгоритма для примера на рис. 12.

*Этап 3.* Организуется детальное обследование выделенных ЛН с целью уточнения их размеров и местоположения. Для формирования траектории движения АНПА вдоль границ областей ЛН может использоваться PD-регулятор, или иной метод, например, на основе аппроксимации границы ЛН по нескольким последним точкам пересечений этой границы. Оконтуривание области считается завершённым, если одновременно выполнены два условия: длина траектории оконтуривания больше некоторого заданного значения и расстояние от точки старта до точки окончания оконтуривания меньше некоторой константы.

Выделение 3-х мерной области возможно выполнить путем локализации ее границ, полученных посредством сечения области ЛН несколькими параллельными плоскостями, соответствующими определенным фиксированным глубинам. Однако при этом продолжительность операции будет приблизительно линейно возрастать с количеством таких плоскостей. Вместо этого предполагается выполнить оконтуривание ЛН для некоторого наиболее

вероятного значения глубины  $d_0$ , которая пересекает интересующие нас области ЛН.

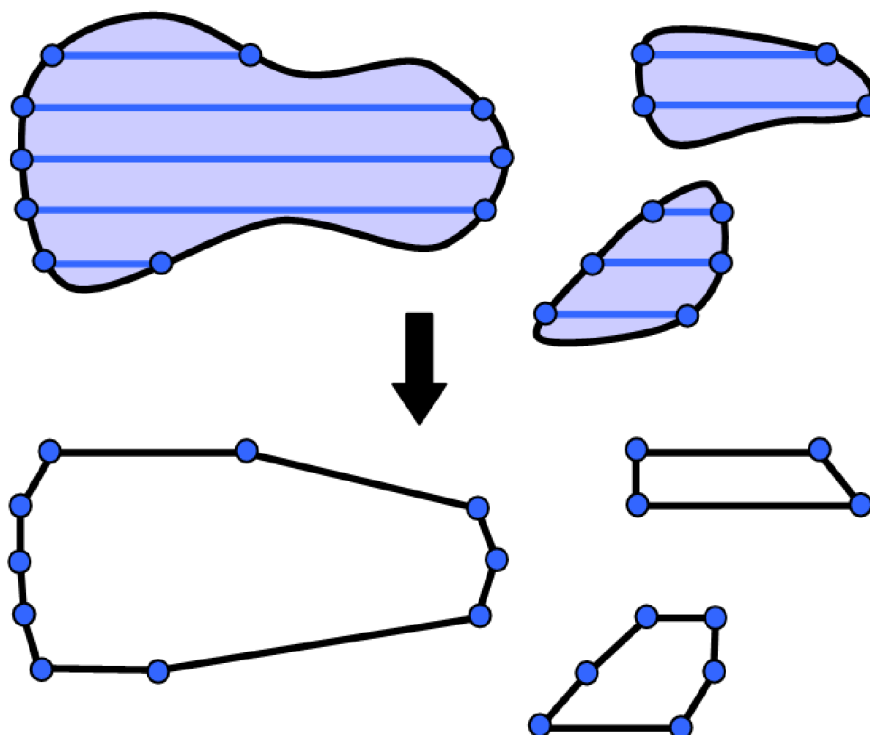


Рис. 13. Этап 2. Визуализация результатов после первых двух шагов работы группового алгоритма.

Каждый раз, когда заканчивается двумерное оконтуривание очередной ЛН, следует оценить ее объем и 3D форму. Для этого используется следующая процедура. Предположим, что в процессе двумерного оконтуривания получена область  $\Omega$ . Затем находится пара наиболее удаленных друг от друга точек границы области  $\Omega$  (**a** и **b**). При этом отрезок, соединяющий **a** и **b**, должен быть целиком расположен внутри области ЛН. Далее производится двумерное оконтуривание в вертикальной плоскости, проходящей через точки **a** и **b**. Таким образом, будет получено сечение искомой трехмерной области двумя перпендикулярными плоскостями (см. рис. 14).

Для восстановления объёма ЛН и количества растворённого в ней вещества, в режиме постобработки данных выполняются следующие действия. Вводится система координат, связанная с ЛН. В ней ось  $Ox$  направлена от **a** к **b**, ось  $Oz$  – вертикально вверх, а ось  $Oy$  таким образом, чтобы получить правую тройку.

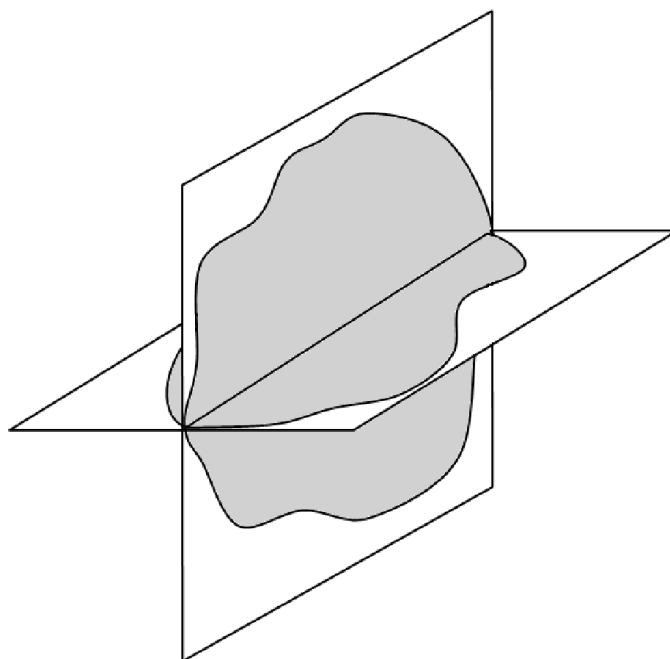


Рис. 14. Схема оконтуривания в двух перпендикулярных плоскостях.

Для получения оперативной оценки объема неоднородности, выполняется аппроксимация границ фигур, образованных сечениями  $\Omega$  вертикальными плоскостями, перпендикулярными оси  $Ox$ . При этом каждая линия сечения описывается функцией  $\rho(\varphi)$ , заданной отдельно в каждой четверти в полярных координатах. Она использует точки пересечения с осями  $OY$  и  $OZ$  –  $A(x)$ ,  $B(x)$ ,  $C(x)$ ,  $D(x)$  (см. рис. 15) и имеет вид

$$\rho(\varphi) = \sqrt{E^2 \cos^2 \varphi + F^2 \sin^2 \varphi}, \quad (21)$$

где для первой четверти  $E = A(x)$ ,  $F = B(x)$ , для второй –  $E = B(x)$ ,  $F = C(x)$ , для третьей –  $E = C(x)$ ,  $F = D(x)$  и для четвертой –  $E = D(x)$ ,  $F = A(x)$ . Соотношения выбраны таким образом, чтобы выполнялись в точности для неоднородности в форме шара, центр которого находится на глубине  $d_0$ .

Затем рассчитываются площади полученных фигур и, далее, оценивается объем области ЛН путем численного интегрирования. Для оценки количества растворенного в воде вещества подводные аппараты совершают дополнительные сквозные пересечения областей ЛН. На основе полученной аппроксимации функции  $Z$  концентрации растворенного вещества внутри областей ЛН выполняется оценка количества содержащегося в области ЛН вещества также посредством численного интегрирования.

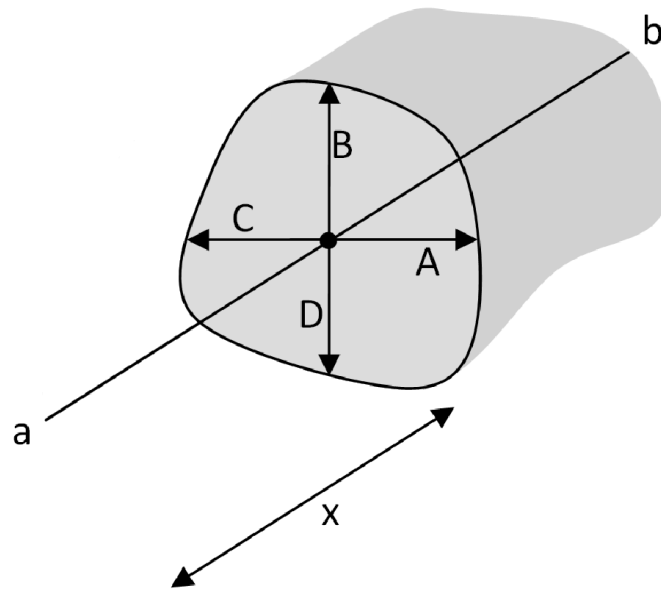


Рис. 15. Срез ЛН плоскостью, перпендикулярной диаметру.

Способ аппроксимации может отличаться в зависимости от физики исследуемого процесса. Например, в вычислительных экспериментах использовалось следующее соотношение (для первой четверти сечения), реализующее билинейную интерполяцию по полярному углу и радиусу:

$$Z(x, y, z) = (1 - \eta)Z(x, 0, 0) + \eta[(1 - \kappa)Z(x, -A(x), 0) + \kappa Z(x, 0, B(x))], \quad (22)$$

$$\eta = |x + iy| / \rho(\varphi), \quad \kappa = 2\varphi / \pi, \quad \varphi = \arg(x + iy).$$

В данном выражении используются координаты, связанные с ЛН.  $Z(x, 0, 0)$  – значение концентрации загрязняющего вещества, полученное при сквозном проходе через ЛН,  $Z(x, -A(x), 0)$  – значение, полученное при горизонтальном оконтуривании,  $Z(x, 0, B(x))$  – значение, полученное при вертикальном оконтуривании.

Для обеспечения групповой работы на третьем этапе метода выполняется планирование на основе решения задачи (3). Первоначальный план строится на основе предположения, что каждой компоненте связности  $G$  соответствует единственная ЛН и её горизонтальное сечение аппроксимируются многоугольником. Первая задача при обследовании ЛН – её оконтуривание в горизонтальной плоскости. Если имеется  $n$  ЛН, и  $i$ -ая неоднородность аппроксимирована многоугольником  $\mathbf{p}_{i,1}, \dots, \mathbf{p}_{i,L_i}$ , то входные данные для задачи (3) задаются как:

$$v_i = L_i, \quad l_{i,j,q} = \frac{1}{U_q} \left( |\mathbf{p}_{i,1} - \mathbf{p}_{i,L_i}| + \sum_{j_1=1}^{L_i-1} |\mathbf{p}_{i,j_1} - \mathbf{p}_{i,j_1+1}| \right), \quad \mathbf{a}_{i,j} = \mathbf{b}_{i,j} = \mathbf{p}_{i,j}. \quad (23)$$

Здесь  $U_q$  – скорость  $i$ -ого аппарата при выполнении оконтуривания. Отличительной особенностью задания, описанного выражениями (23) является то, что оконтуривание может быть начато из любой вершины многоугольника, аппроксимирующего ЛН.

На этапе контроля выполнения плана между центральным узлом и каждым АНПА группы может быть организована передача сообщений о посещении точек  $\mathbf{p}_{ij}$ . Если при выполнении  $i$ -ого задания какая-либо из точек  $\mathbf{p}_{ij}$  оказалась не посещена, формируются новые задания горизонтального оконтуривания из оставшихся точек и выполняется перепланирование.

Для оценки времени выполнения вертикального оконтуривания используется соотношение, верное для ЛН в форме шара. Для  $i$ -ой ЛН к заданиям (23) добавлены следующие:

$$\begin{aligned} v_{n+i} = 2, \quad l_{n+i,1,q} = l_{n+i,2,q} = |\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i| / U_q, \quad \mathbf{a}_{n+i,1} = \mathbf{b}_{n+i,2} = \mathbf{p}_i, \quad \mathbf{a}_{n+i,2} = \mathbf{b}_{n+i,1} = \mathbf{q}_i, \\ v_{2n+i} = 2, \quad l_{2n+i,1,q} = l_{2n+i,2,q} = \pi |\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i| / U_q, \quad \mathbf{a}_{2n+i,1} = \mathbf{b}_{2n+i,2} = \mathbf{p}_i, \quad \mathbf{a}_{2n+i,2} = \mathbf{b}_{2n+i,1} = \mathbf{q}_i. \end{aligned} \quad (24)$$

Первое из указанных выражений соответствует заданию по сквозному проходу через ЛН. Задание может быть выполнено двумя способами, поскольку проход может быть выполнен в любом из двух направлений. Второе выражение соответствует вертикальному оконтуриванию.

Таким образом, для каждой локальной неоднородности имеется тройка заданий, которые могут быть выполнены независимо друг от друга.

## 4.2. Результаты моделирования

С целью исследования предложенного метода был проведён ряд вычислительных экспериментов с применением технологии имитационного моделирования. При этом для расчета перемещения АНПА использовалась кинематическая модель. Локальные неоднородности были заданы аналитической формулой. Рассматривалась работа модели в объеме, ограниченном параллелепипедом



$$\{(x, y, z): 0 \leq x \leq 700, 0 \leq y \leq 500, 0 \leq z \leq 300\}. \quad (25)$$

Аналитическое выражение для описания ЛН имеет вид:

$$Z(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^q \frac{\alpha_i}{\beta_i + |\mathbf{x} - \gamma_i|^2}, \quad (26)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma_i$  – векторы числовых параметров,  $\mathbf{x}$  – точка трёхмерного пространства. Для оконтуривания областей ЛН использовался порог значения поля на уровне 0.7, количество подводных аппаратов в большинстве вычислительных экспериментов было выбрано равным трем (но могло изменяться в процессе эксперимента), шаг меандра был принят равным 50. В качестве рабочей глубины было выбрано значение, соответствующее  $z = d_0 = 150$  (в данной модели полагается, что  $Oxy$  в глобальной системе координат – это плоскость постоянной глубины; при этом направление возрастания глубины значения не имеет).

В вычислительном эксперименте №1 были использованы следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} \alpha &= (5000, 5000, 5000, 4000, 5000)^T, \\ \beta &= (5000, 5000, 5000, 5000, 5000)^T, \\ \gamma_1 &= \begin{pmatrix} 150 \\ 250 \\ 150 \end{pmatrix}, \gamma_2 = \begin{pmatrix} 350 \\ 320 \\ 150 \end{pmatrix}, \gamma_3 = \begin{pmatrix} 400 \\ 200 \\ 150 \end{pmatrix}, \gamma_4 = \begin{pmatrix} 610 \\ 100 \\ 120 \end{pmatrix}, \gamma_5 = \begin{pmatrix} 620 \\ 400 \\ 180 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (27)$$

Визуализация соответствующих ЛН представлена на (рис. 16).

После предварительного прохода меандром было выявлено три области ЛН. Затем после горизонтального и вертикального оконтуривания и прохода через область ЛН на основе полученных модельных измерений была произведена оценка объемов выделенных областей ЛН и массы содержащегося в них растворенного вещества.

Далее исследовалось, насколько точным является предложенный метод оценки указанных выше параметров. Получаемая ошибка складывается из ошибки оконтуривания (она зависит от траектории АНПА) и от ошибки самого метода вычисления объема (эта ошибка зависит от выбранных плоскостей сечения, от формы области и от выбранного способа аппроксимации).

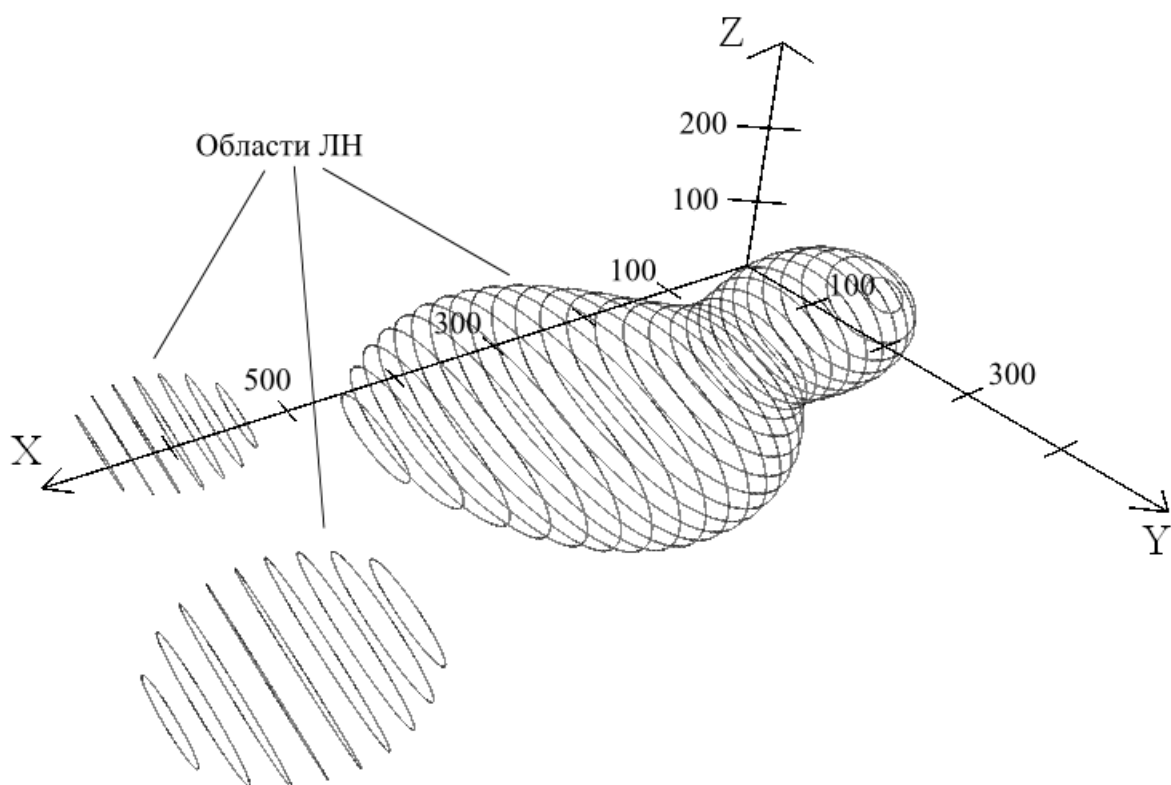


Рис. 16. Визуализация ЛН в вычислительном эксперименте №1. Области ЛН визуализированы с помощью сечений их границ плоскостями, параллельными друг другу и плоскости  $Oyz$ .

В вычислительном эксперименте №2 была задана ЛН в виде идеального шара. Соответствующие значения параметров и визуализация ЛН представлены на рис. 17. Центр шара лежит в точности на плоскости глубины  $d_0$ .

В вычислительном эксперименте №3 на акватории было расположено 5 ЛН. Соответствующие значения параметров и визуализация ЛН представлены на рис. 18. Указанные параметры определяют 5 неоднородностей, 4 из которых зеркально симметричны друг другу, имеют одинаковый объем и массы растворённого вещества.

В таблице 2 представлены результаты восстановления объёмов ЛН в описанных вычислительных экспериментах. Во второй колонке указано значение объема каждой неоднородности. Оно получено как среднее арифметическое между верхней и нижней оценками объема (назовём их  $V_1$  и  $V_2$ ).  $V_1$  и  $V_2$ , в свою очередь, получены путём численного интегрирования. Использовались

соответственно описанные и вписанные параллелепипеды. Ошибка оценки объёма, представленная в третьей колонке, была вычислена по формуле

$$\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} 100\%. \quad (28)$$

Для экспериментов №2 и №3 данные получены аналитически, поэтому ошибка оценки объёма равна нулю. Для всех остальных экспериментов ошибка в определении объёма не превышает 1%. Далее в таблице приводятся оценки объёмов ЛН, полученных в соответствии с предложенным методом. При этом рассматриваются две характеристики: оценка, полученная при условии, что АНПА идеально следует линии уровня, и оценка, полученная при моделировании работы PD-регулятора. Это позволяет оценить, как соотносятся различные факторы, составляющие ошибку восстановления объёма. Для каждой оценки приводится её относительная погрешность. В таблице 3 представлены аналогичные результаты для восстановления массы.

$$\alpha = (20000),$$

$$\beta = (5000),$$

$$\gamma_1 = \begin{pmatrix} 350 \\ 250 \\ 150 \end{pmatrix}.$$

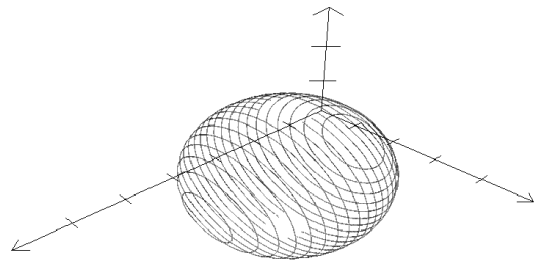


Рис. 17. Входные данные вычислительного эксперимента №2:  
значения параметров (слева), визуализация ЛН (справа).

$$\alpha = (4000, 4000, 4000, 4000)^T,$$

$$\beta = (5000, 5000, 5000, 5000)^T,$$

$$\gamma_{1..5} = \begin{pmatrix} 150 & 150 & 350 & 550 & 550 \\ 120 & 380 & 250 & 120 & 380 \\ 150 & 150 & 150 & 150 & 150 \end{pmatrix}.$$

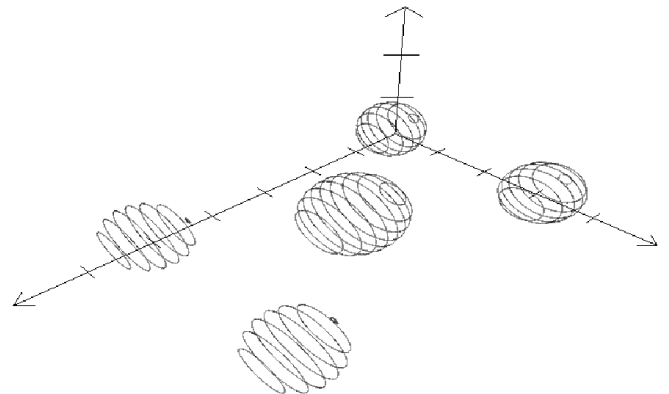


Рис. 18. Входные данные вычислительного эксперимента №3:  
значения параметров (слева), визуализация ЛН (справа).

Таблица 2. Результаты восстановления объёма ЛН.

№ ВЭ	Оценка объёма численно	Ошибка оценки (%)	Оценка объёма по идеальной траектории	Ошибка (%)	Оценка объёма по полученной траектории	Ошибка (%)
1	9616002,81	0,29	10348768,91	7,62	10622191,06	10,46
	735817,765	0,66	710118,82	3,49	773483,01	5,12
	1339985,2	0,54	1317974,82	1,64	1363686,83	1,77
2	15158891,98	0,00	15158830,46	0,00	15239667,23	0,53
3	527208,35	0,74	527497,22	0,05	556937,23	5,64
	527208,35	0,74	527473,73	0,05	555105,86	5,29
	527208,35	0,74	527400,3	0,04	551762,48	4,66
	527208,35	0,74	527384,2	0,03	550651,99	4,45
	1127419,79	0,56	1130436,66	0,27	1171597,96	3,92

Таблица 3. Результаты восстановления массы загрязняющего вещества ЛН.

№ ВЭ	Оценка массы численно	Ошибка оценки (%)	Оценка массы по идеальной траектории	Ошибка (%)	Оценка массы по полученной траектории	Ошибка (%)
1	8564889,455	0,32	8543955,58	0,08	8784224,88	2,89
	583867,575	0,68	562853,46	2,94	549617,27	5,22
	1121013,77	0,57	1045245,56	6,22	1006626,97	9,69
2	18341113,11	0,00	19915973,07	8,59	19989718,59	8,99
3	414714,565	0,76	405746,11	1,41	417246,58	1,39
	414714,565	0,76	405760,96	1,41	416877,73	1,30
	414714,565	0,76	405370,78	1,50	415128,3	0,87
	414714,565	0,76	405508,19	1,47	411788,11	0,06
	909929,435	0,59	888426,61	1,78	909424,84	0,54

Для большей части ЛН, погрешность восстановления параметров находится в пределах 10%. Она складывается из нескольких факторов. Первый фактор, влияющий на погрешность – это различия между выбранной моделью локальной неоднородности и способом интерполяции (выражение (26) определяет ЛН, спадающую по квадратичному закону, а выражение (22) интерполирует функцию  $Z$  линейно по радиусу). Влияние данного фактора легко проследить, сравнив данные для объёма и для массы в эксперименте №2. При определении объёма фактически происходит интегрирование функции, равной 1 внутри области, и 0 – снаружи области. Данный фактор отсутствует и остаётся погрешность порядка 0,5%, связанная с неточным следованием траектории. В случае же определения массы, погрешность составляет порядка 9%. Второй существенный фактор имеет место, когда траектория АНПА не проходит через центр ЛН и пиковое значение концентрации восстановить не удаётся.

Наибольшая погрешность оценки объёма (порядка 10%) возникает в эксперименте №1 из-за неправильной формы локальной неоднородности (см. рис. 16).

### 4.3. Групповая работа

Организация работы группы АНПА в вычислительных экспериментах осуществлялась на основе решения задачи планирования (3). Для каждой ЛН формировалась тройка заданий в соответствии с выражениями (23) и (24). Рассматривались следующие вопросы:

- соотношения эффективности алгоритмов из раздела 2.2;
- работа механизма перепланирования при удалении АНПА;
- влияние количества АНПА на скорость выполнения операции.

На рис. 19 представлены результаты работы алгоритмов планирования для ЛН, описанной выше и состоящей из трех областей. В данном случае имеется 9 неделимых заданий, включающих для каждой области горизонтальное и вертикальное оконтуривание, а также сквозное пересечение области. Вдоль временной шкалы отображены результаты распределения заданий. Разрывы между некоторыми заданиями минимальны – это задания, связанные с одной и

той же ЛН. Каждое название обозначено буквой и числом. Буква обозначает тип манёвра («Г» – горизонтальное оконтуривание, «В» – вертикальное оконтуривание, «С» – сквозной проход), а число – номер ЛН. Можно заметить, что стоимость плана, полученная с использованием модификации алгоритма Хельда-Карпа на 2,5% ниже, чем стоимость плана по аукционному алгоритму.

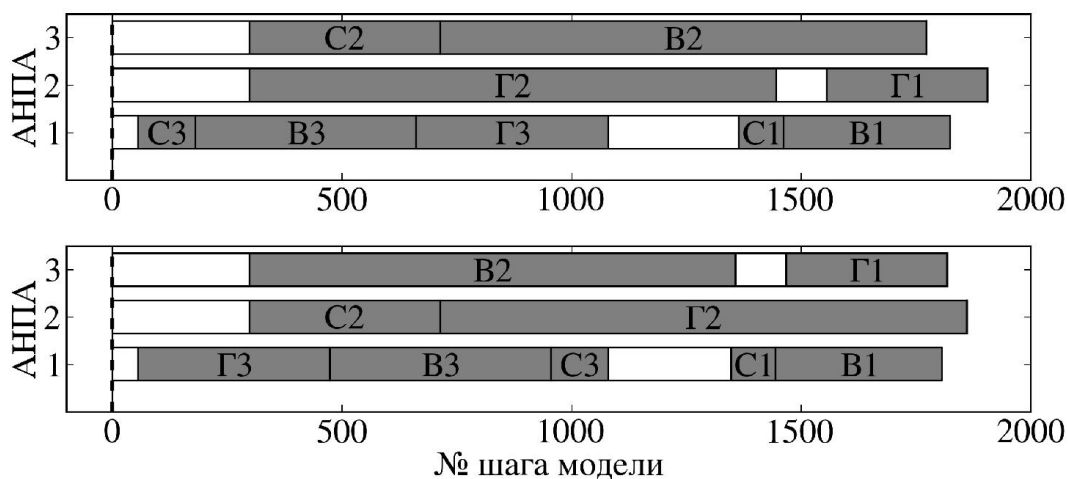


Рис. 19. Вычислительный эксперимент №1. План, полученный с помощью аукционного метода (вверху) и план, полученный с помощью модификации алгоритма Хельда-Карпа (внизу).

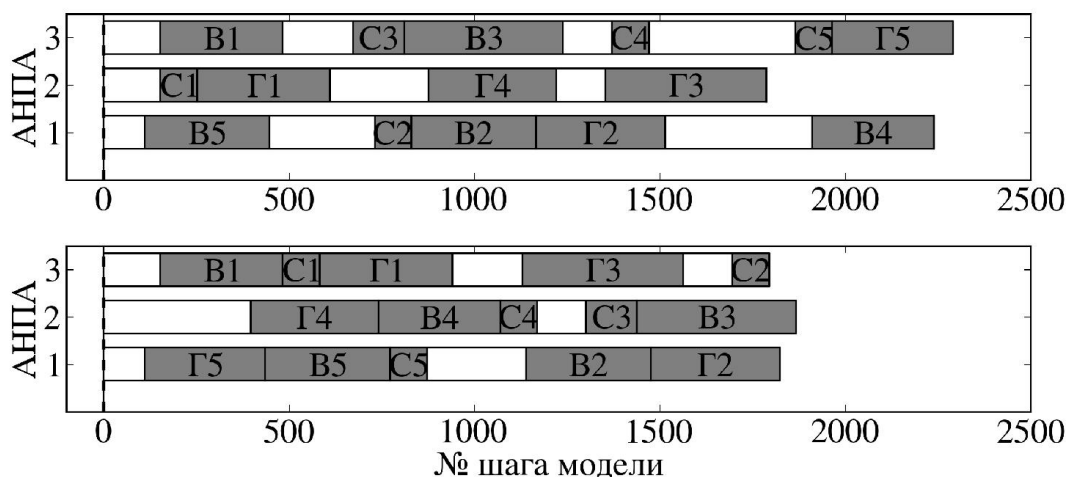


Рис. 20. Вычислительный эксперимент №3. План, полученный с помощью аукционного метода (вверху) и план, полученный с помощью модификации алгоритма Хельда-Карпа (внизу).

Затем было выполнено моделирование работы предложенных алгоритмов в случае, когда имеется пять приблизительно одинаковых по размеру ЛН – вычислительный эксперимент №3. В данной ситуации имеется 15 неделимых заданий. Результаты планирования при штатной работе АНПА приведены на рис. 20. В данном случае разница между эффективностью двух алгоритмов составления плана более заметна и составляет порядка 22%.

Эксперимент №3 был использован для сравнения времени работы группы из трёх АНПА со временем работы такого же количества независимых аппаратов. Оптимальное время выполнения этапа 2 составляет в данном эксперименте 1880 шагов модели (см. рис. 20). В случае, использования трёх независимых АНПА, каждому из которых выделена треть рассматриваемой области, первый аппарат получит область с двумя ЛН, второй – с одной ЛН, третий – с двумя ЛН (см. рис. 18). Время выполнения этапа 2, таким образом, составит 1986 шагов, что на 5,6% дольше. В данном случае время выполнения этапа 2 определяется временем обследования двух ЛН первым и третьим АНПА. Прирост эффективности будет выше, если рассмотреть поле из эксперимента №3, в котором отсутствует неоднородность в середине. В таком случае оптимальное время выполнения этапа 2 составило 1510 шагов, а время выполнения данного этапа тремя независимыми АНПА по-прежнему будет равно 1986 шагов, что на 31% дольше.

Далее рассматривается перепланирование в случае выхода одного из аппаратов из строя. На рис. 21 изображён план в случае, когда аппарат №2 выходит из строя во время выполнения второго задания. Использовалось оптимальное планирование с помощью алгоритма Хельда-Карпа. В соответствии с правилом неделимости заданий, аппараты №1 и №3 продолжают текущие работы («В3» и «В2» соответственно), но дальнейшие их действия перепланируются. Можно, например, заметить, что задание, на котором был прерван второй АНПА («Г2» – горизонтальное оконтуривание самой большой ЛН) назначается первому аппарату.

Аналогичный пример представлен на рис. 22. Здесь аппарат №3 выходит из состава группы при выполнении задания «С1». Оставшиеся его задания

распределяются между другими АНПА. При этом они не просто добавляются в конец существующих планов, а происходит полное перепланирование с учётом времени, необходимого чтобы закончить текущие задания. Например, задание «С2» вставляется в план АНПА №1 между «В2» и «Г2».

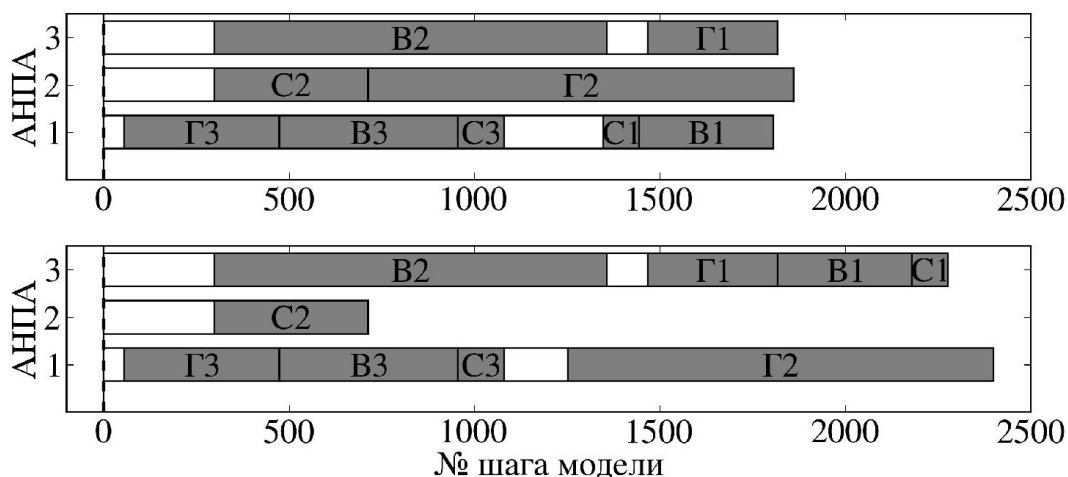


Рис. 21. Вычислительный эксперимент №1. Оптимальный план (вверху).  
АНПА №2 выходит из состава группы на шаге №1000 (внизу).

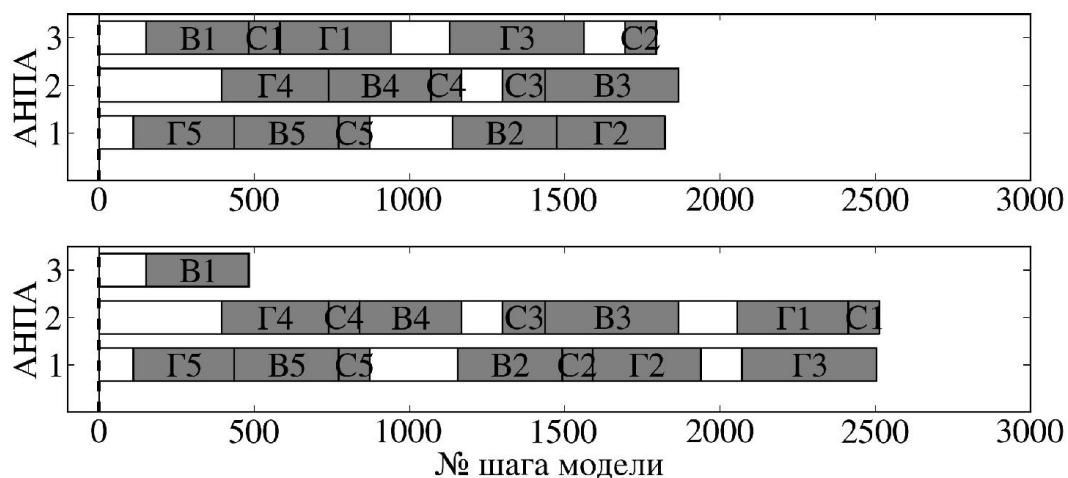


Рис. 22. Вычислительный эксперимент №3. Оптимальный план (вверху).  
АНПА №3 выходит из состава группы на шаге №500 (внизу).

#### 4.4. Выводы

Разработан и исследован метод для локализации и оценки размеров областей ЛН в заданной акватории с помощью группы АНПА. Метод впервые позволяет не только выявить количество ЛН и их местоположение, но также оценить их объем и количество растворённого в них вещества.



Предложен набор неделимых элементарных заданий, включающий горизонтальное и вертикальное оконтуривание ЛН, а также проход через неоднородность с целью измерения концентрации растворенного вещества. Элементарные задания распределяются между АНПА таким образом, чтобы минимизировать время обследования указанной области.

Для составления оптимального плана, используются алгоритмы, разработанные во второй главе, и произведено сравнение их эффективности на некоторых примерах. Приведены результаты работы алгоритмов в случае перепланирования. Следует отметить, что аукционный алгоритм незначительно уступает точному алгоритму по эффективности для небольших примеров, но более прост в реализации и накладывает существенно меньшие требования к вычислительным ресурсам системы.

Продемонстрирован пример, в котором время работы независимых АНПА на 31% больше, чем при работе группы.

## **ГЛАВА 5. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ И РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ НА АНПА «МАРК»**

Первый раздел настоящей главы посвящён комплексу программ, предназначенному для проведения вычислительного эксперимента. Комплекс использует технологию имитационного моделирования и реализует исследованные в диссертации методы и алгоритмы.

Второй раздел описывает систему программного управления /СПУ/ для группы автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/. Описаны состав и структура СПУ при ее использовании для АНПА «МАРК», и средства, обеспечивающие управление группой аппаратов. Приведены некоторые детали реализации СПУ и результаты испытаний АНПА «МАРК».

### **5.1. Комплекс программ для имитационного моделирования работы группы АНПА**

Основная технология, использованная для исследования предложенных в диссертационной работе алгоритмов и методов – технология имитационного моделирования. Она предполагает наличие комплекса программ со следующими функциональными возможностями:

- Формирование набора заданий для работы заданного метода на заданной акватории.
- Моделирование работы группы АНПА в соответствии со сформированным множеством заданий. Планирование и перепланирование. Возможность удалять АНПА из группы и добавлять их в группу в процессе работы модели.
- Поддержка задания АНПА «проход по отрезку».
- Поддержка задания АНПА «горизонтальное/вертикальное оконтуривание».
- Поддержка задания АНПА «меандр с переменным шагом».
- Генерация двумерных скалярных полей с заданными статистическими характеристиками.
- Поддержка двумерных скалярных полей, заданных растровой картой.

- Поддержка трёхмерных скалярных полей, заданных аналитическим выражением.
- Формирование отчётов со статистическими характеристиками двумерных скалярных полей.
- Формирование отчётов о выполнении миссии, построение временных диаграмм.
- Визуализация полей, над которыми производится работа, визуализация траекторий АНПА по мере их формирования.

Ввиду отсутствия существующего комплекса программ, удовлетворяющего указанным требованиям, в процессе диссертационной работы был разработан собственный имитационно-моделирующий комплекс. Комплекс состоит из исполняемого файла и набора сценариев для постобработки результатов. Для реализации комплекса были выбраны языки программирования C++ и Python. Для визуализации были использованы библиотеки Qt и OpenGL. Управление исходным кодом осуществлялось с использованием системы контроля версий git.

### 5.1.1. Структура комплекса

При создании комплекса программ применялись методы объектно-ориентированного программирования, что позволило обеспечить гибкую структуру с взаимозаменяемыми компонентами, содержащую более 40 модулей. Основу комплекса составляют четыре класса объектов: планировщик, модель АНПА, модель среды и графический интерфейс. Данные, передаваемые между объектами классов, схематично представлены на рис. 23. Поддержка различных моделей среды, различных алгоритмов выполнения заданий и разбиения миссии на задачи реализована посредством наследования.

Планировщик управляет ходом выполнения миссии. Данный компонент содержит реализацию алгоритмов решения задачи (3) и декомпозицию миссии в соответствии с выражениями (19), (23), (24). Каждый раз, когда аппарат выполнил очередное задание или приступил к очередному заданию, он посылает отчёт об этом планировщику. Таким образом, планировщик хранит планы и информацию о

статусе заданий и аппаратов. В случае если один из АНПА выполнил все задания в соответствии со своим текущим планом, происходит перепланирование.

На каждой итерации модели планировщик обращается к «сценарию» миссии, в котором отмечены события вида «АНПА №n выходит из состава группы» и «новый АНПА присоединяется к группе». Таким образом, реализована возможность моделирования непредвиденных ситуаций.

Модель АНПА содержит:

- алгоритмы выполнения заданий – обычный проход вдоль заданной траектории, оконтуривание ЛН, меандр с переменным шагом;
- состояние системы программного управления АНПА – имеется ли целевая точка движения и, если да, то её координаты;
- модель датчика для измерения параметра среды;
- модель движения.

Модель АНПА отражает те свойства объекта исследования, которые рассматриваются как существенные для исследования. Для отладки верхнего уровня управления использовались наиболее простые модели датчика (идеальный датчик, либо датчик с нормальным шумом) и движения (кинематическая модель материальной точки).

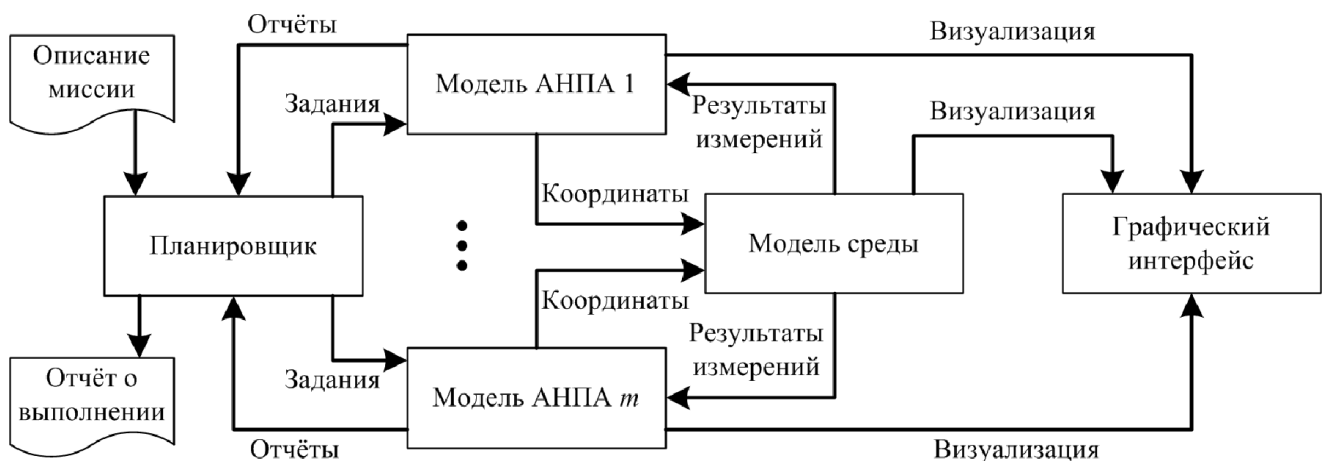


Рис. 23. Обмен данными между объектами комплекса программ.

### 5.1.2. Модель среды

Модель среды представляет собой скалярное поле. Модель каждого АНПА на каждой итерации обращается к модели среды с запросом о значении поля в

Визуализация линии уровня ( $X, Y, Z, dx, dy, dz, d$ )

1. для  $x$  от 0 до  $X$  с шагом  $dx$ :
2.     для  $z$  от 0 до  $Z$  с шагом  $dz$ :
3.          $s_0 \leftarrow s_1$ ;
4.          $s_1 \leftarrow ( )$ ;
5.     для  $y$  от 0 до  $Y-dy$  с шагом  $dy$ :
6.          $v_1 \leftarrow f(x, y, z)$ ;
7.          $v_2 \leftarrow f(x, y+dy, z)$ ;
8.         если  $(v_1 < f_0) = (v_2 < f_0)$ :
9.             продолжить;
10.          $y_1 \leftarrow$  двоичный поиск  $(x, z, y, y+dy, f_0)$ ;
11.          $s_1 \leftarrow (s_1 y_1)$ ;
12.      $j \leftarrow 0$ ;
13.     для  $i \in 1..|s_0|$ :
14.         пока  $j < |s_1|$  и  $s_{1,j} < s_{0,i} - d$ :
15.              $j \leftarrow j + 1$ ;
16.          $k \leftarrow j$ ;
17.         пока  $k < |s_1|$  и  $s_{1,k} < s_{0,i} + d$ :
18.             добавить отрезок  $(x, s_{0,i}, z - dz) - (x, s_{1,k}, z)$ ;
19.          $k \leftarrow k + 1$ ;

Рис. 24. Алгоритм формирования ломаной для визуализации поверхности уровня  $f_0$  трёхмерного скалярного поля  $f$ .

точке, в которой находится аппарат. Реализована работа с полями, заданными одним из следующих способов:

- Аналитическое выражение (двумерное или трёхмерное поле). Данный способ используется для моделирования морской среды, содержащей локальные неоднородности (например, модель вида (26)).

- Растровая карта (только двумерные поля). Используется для загрузки ранее сгенерированных данных, или цифровых моделей рельефа, полученных из других источников (например, [46]).
- Параметры алгоритма генерации (только двумерные поля). Применяется для генерирования двумерных скалярных полей с заданными статистическими характеристиками.

Для трёхмерных полей производится визуализация заданной поверхности уровня. Для этого строятся линии пересечения поверхности уровня с набором параллельных друг другу плоскостей. Линии аппроксимируются ломаными в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 24.

Для получения всех отрезков, составляющих ломаную, алгоритм вызывается дважды, при этом меняется местами роль координат  $Y$  и  $Z$ . На вход алгоритма поступают следующие параметры: по координатные размеры рассматриваемой области ( $X, Y, Z$ ), шаг по каждой из осей ( $dx, dy, dz$ ) и параметр разрыва линии  $d$ . Во внешнем цикле на строке 1 происходит перебор всех плоскостей, для которых вычисляется линия их пересечения с линией уровня  $f_0$ . Для каждой плоскости перебираются прямые постоянного  $z$  (строка 2). Для каждой зафиксированной таким образом прямой происходит поиск её пересечения с искомой линией уровня. Это осуществляется и использованием комбинации линейного и двоичного поиска в строках 5–11. В строках 13–19 происходит сопоставление найденных точек искомой линии на рассматриваемой прямой и на предыдущей прямой. Для этого производится перемещение двух указателей ( $i$  и  $j$ ) по спискам найденных пересечений. Время работы последнего этапа алгоритма линейно зависит от количества найденных точек пересечения на текущей и на предыдущей итерациях (количество итераций цикла на строках 17–19 можно оценить сверху константой при фиксированных  $dy$  и  $d$ ). Таким образом, асимптотическая сложность предложенного алгоритма составляет

$O\left(\frac{V_{\text{общий}}}{V_{\text{ячейки}}} \cdot \log \frac{dy}{\varepsilon}\right)$ , где  $V_{\text{общий}} = XYZ$ ,  $V_{\text{ячейки}} = dx dy dz$ ,  $\varepsilon$  – точность, используемая в двоичном поиске. Это представляет собой грубую оценку сверху, поскольку для

каждого цикла на строках 5-11 вызов двоичного поиска происходит лишь на тех итерациях, где не выполняется условие строки 8. Количество таких итераций не превосходит удвоенного числа ЛН. Для поля, описываемого выражениями (25-27) при  $dx = 15$ ,  $dy = dz = 5$ ,  $d = 10$ , результат работы алгоритма представлен на рис. 16.

Поддержка двумерных растровых карт предусмотрена для использования в экспериментах реальных геопространственных данных, в частности – цифровых моделей рельефа. Для двумерных растровых карт предусмотрены инструменты визуализации и статистического анализа (вычисление СКО, построение вариограммы). Для визуализации используется цветовая палитра MATLAB. Пример визуализации двумерного поля изображён на рис. 25.

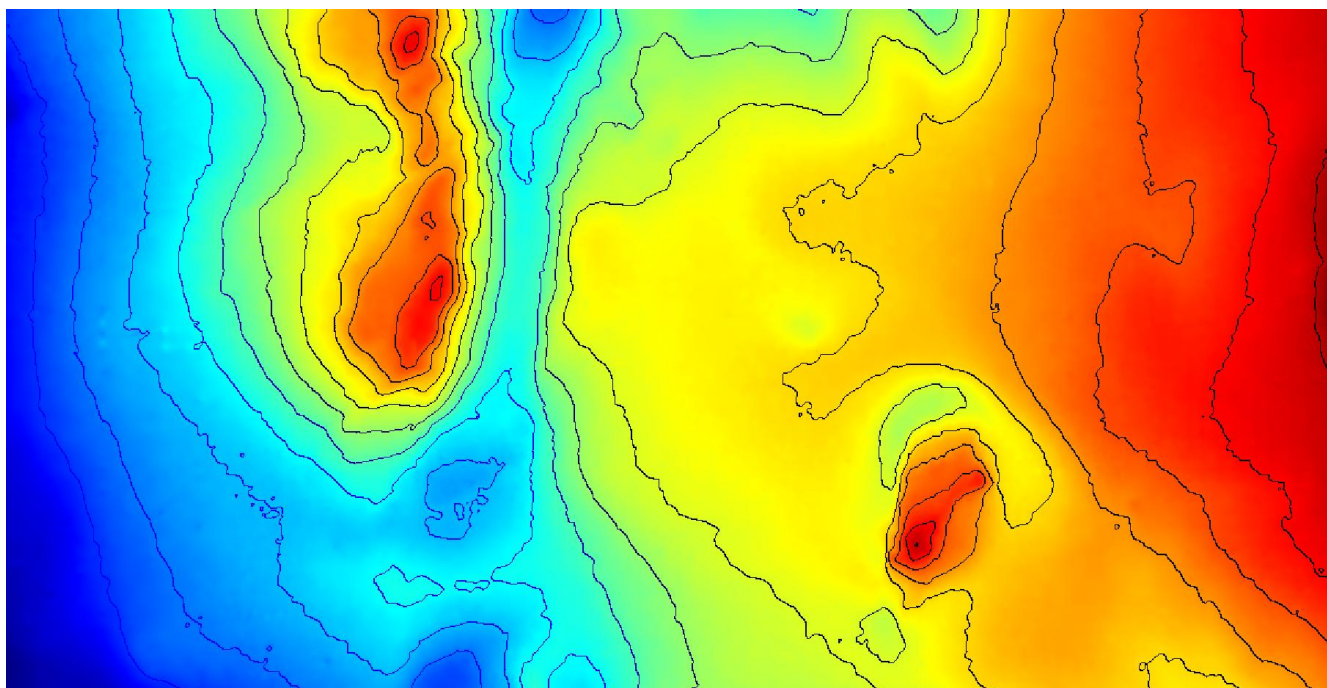


Рис. 25. Визуализация фрагмента батиметрической модели [46]. Различными цветами передано расстояние до дна, отображены изолинии.

С целью генерирования искусственных данных для экспериментов из третьей главы был использован метод последовательного гауссова стохастического моделирования (ПГСМ, см. [10]), модифицированный для создания полей с нестационарной АКФ. Поле генерировалось сумма реализаций двух гауссовых процессов. Были выбраны именно гауссовы процессы, поскольку для них условное распределение значения в очередной точке исходя из уже

известных значений в некоторых точках вновь является гауссовым.

Использованный алгоритм имеет следующий вид:

1. Сгенерировать  $P$  – последовательность указанной длины  $|P|$  из случайных точек, с равномерным распределением по всей указанной области.
2. Сгенерировать  $Z(P_1) \sim N(0,1)$ .
3. Для всех остальных  $P_i$  последовательно сгенерировать значения  $Z(P_i) \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ , где  $\mu_i$  и  $\sigma_i^2$  определяются исходя из метода простого кригинга с нулевым средним (здесь  $N(\mu_i, \sigma_i^2)$  – условное распределение) и с ковариационной функцией вида  $K(h) = \sigma^2 \exp(-h^2 / \rho^2)$  при  $\sigma = 1, \rho = \rho_1$ .
4. Восстановить значение во всех остальных узлах равномерной сетки как среднее, вычисленное методом простого кригинга с нулевым средним.
5. Сгенерировать  $Q$  – последовательность указанной длины  $|Q|$  из случайных точек, с равномерным распределением по части указанной области.
6. Прodelать шаги, аналогичные шагам 2–4, но использовать значение  $\rho = \rho_2$ , вычисление окончательного значения в каждом узле равномерной сетки производится также по всей указанной области.
7. Вычислить сумму двух сеточных функций.

На рис. 6 представлен результат работы алгоритма при  $\rho_1 = 100, \rho_2 = 20$ ; размер сетки  $1200 \times 700$ ,  $|P| = |Q| = 700$ , часть с меньшим  $\rho$  представляет собой квадрат размером  $200 \times 200$  в середине указанной области. Отдельные части результата представлены на рис. 26.

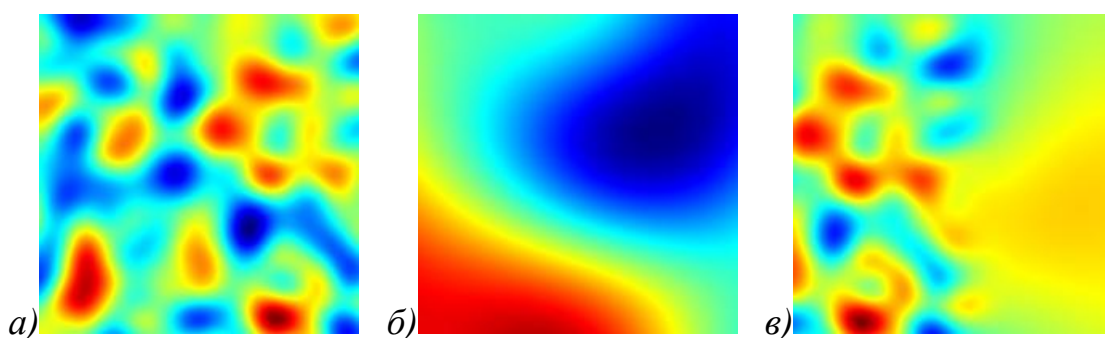


Рис. 26. Результат применения модификации метода ПГСМ а) часть области с  $\rho = 20$ ; б) часть области с  $\rho = 100$ ; в) граница двух частей.



## 5.2. Реализация централизованного управления в составе СПУ АНПА «МАРК»

### 5.2.1. Состав и архитектура СПУ

АНПА «МАРК» [6] разработан в 2011 году в НОЦ «Подводная робототехника», образованном на базе ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН. Он представляет собой малогабаритный аппарат массой 50 кг и предназначен для работ на глубинах до 200 м. На борту АНПА развёрнута локальная вычислительная сеть /ЛВС/, основу которой составляет промышленный компьютер. Структура ЛВС приведена на рис. 27.

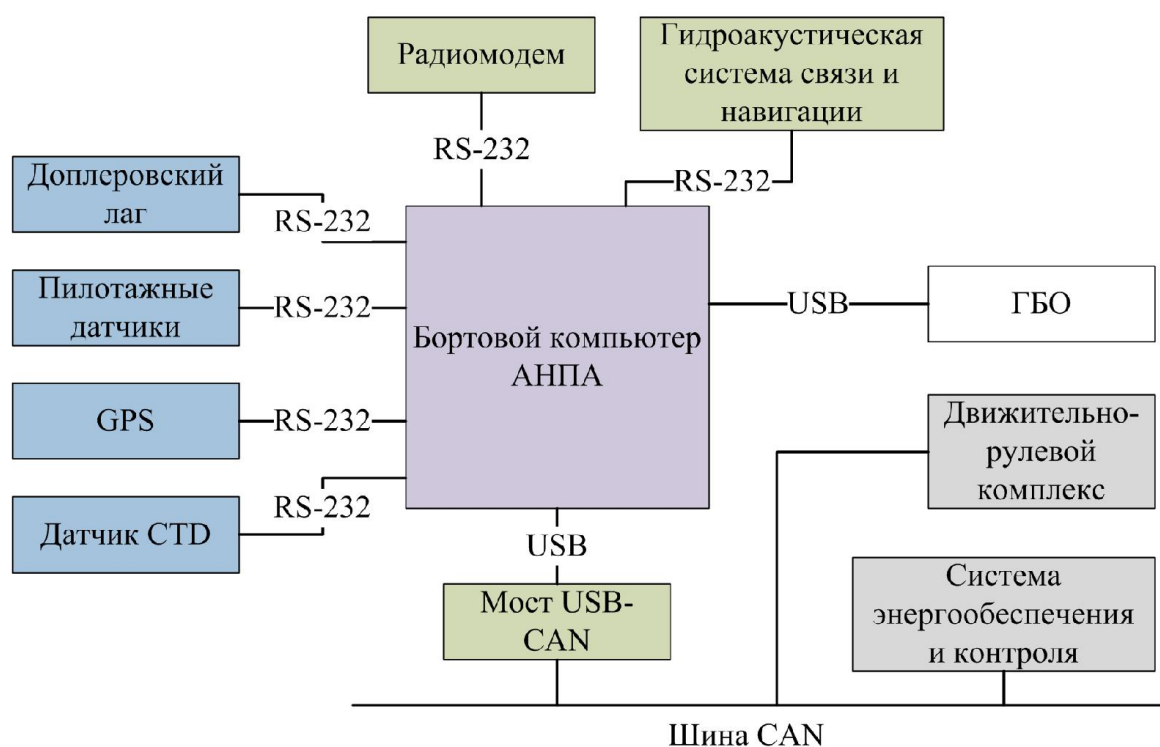


Рис. 27. Структура ЛВС АНПА «МАРК».

СПУ, используемая для аппарата «МАРК», представляет собой гибридную систему. Она выполнена в виде набора исполняемых модулей, работающих одновременно. Некоторые модули предназначены для работы на бортовом компьютере АНПА, в то время как другие используются на компьютере оператора. Модули распределяются по уровням следующим образом:

- Нижний уровень составляют драйверы бортовых устройств, навигационная программа, регуляторы движения, контрольно-аварийная система. Для

модулей нижнего уровня характерен частый обмен данными (десятки сообщений в секунду).

- Средний уровень представлен менеджером групповой миссии. Этот модуль выполняет план, сформированный центральным узлом. План разбивается на набор элементарных действий, имеющих в библиотеке заданий АНПА.
- Верхний уровень состоит из пульта оператора и планировщика. Последний реализует функции центрального узла при управлении. Он может быть запущен как на компьютере судового поста оператора /СПО/, так и на одном из АНПА.

Для обеспечения связи между модулями используется обмен сообщениями, что позволяет естественным образом обобщить передачу данных между модулями на обмен сообщениями между АНПА и центральным узлом. Используется библиотека IPC, передающая сообщения через сетевые сокеты, что позволяет запускать модули СПУ в различных конфигурациях на нескольких бортовых компьютерах.

СПУ предназначена для работы под управлением ОС Linux (на бортовом компьютере АНПА «МАРК» используется сборка ядра версии 2.6). Однако части бортовой системы в целях отладки могут быть запущены и под управлением ОС Windows (это необходимо при использовании трёхмерной модели для отладки миссий [12]). По этой причине основные модули СПУ могут быть скомпилированы и под Linux и под Windows.

Реализация СПУ на настоящий момент включает порядка 20 модулей, не считая вспомогательных, предназначенных для отладки и диагностики. Основными языками программирования являются C и C++. Для создания приложений с графическим интерфейсом используется платформа Qt. Для организации коллективной работы программистов используется распределённая система контроля версий git.

На рис. 28 представлена схема части СПУ на одном из АНПА группы. Прямоугольниками обозначены модули СПУ (каждый представляет собой отдельный исполняемый модуль операционной системы).

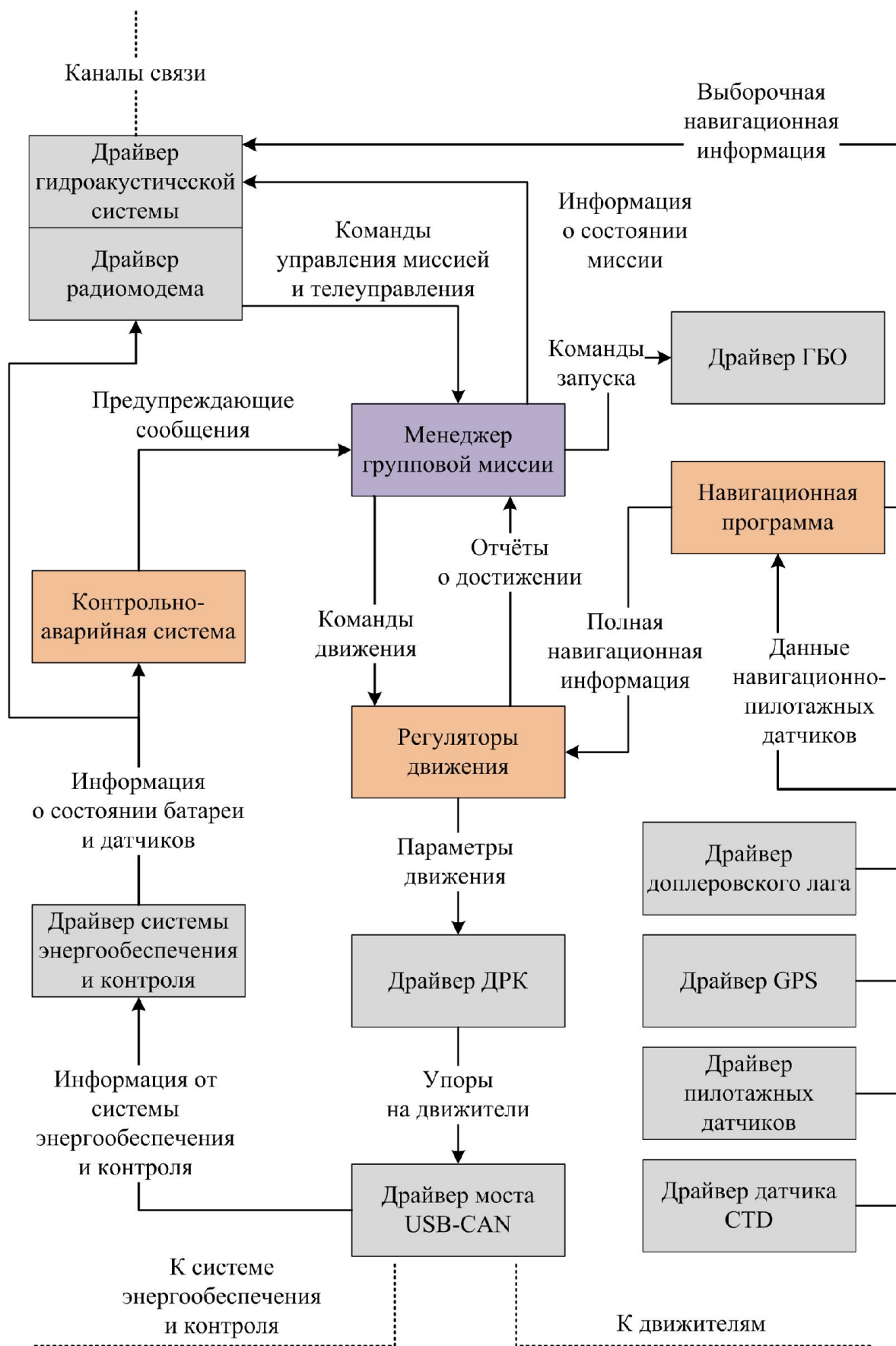


Рис. 28. Структура СПУ на борту одного АНПА.

Стрелки между модулями означают передачу сообщений IPC. Подобное разделение на модули типично для систем с гибридной архитектурой (например, в системах, описанных в работах [1, 50, 86]). В таких системах модуль, выполняющий миссию, отдаёт команды другим бортовым устройствам в соответствии с фиксированной (как правило) программой. Например, команды движения передаются в модуль регуляторов, который формирует окончательные упоры и вращающие моменты на основе полученной команды и навигационной информации. Затем этот же модуль (или в нашем случае – другой модуль под названием «Драйвер ДРК») формирует управляющие сигналы на движители. Основное отличие рассматриваемой системы состоит в алгоритме работы модуля «Менеджер групповой миссии», который обеспечивает выполнение миссии не в виде заранее определённой программы, а в виде последовательности заданий, полученной от центрального узла, осуществляя при этом контроль выполнения.

Общая структура СПУ приведена на рис. 29 в предположении, что центральным узлом является пост оператора. Для передачи IPC-сообщений между АНПА и центральным узлом используется следующая схема (на примере передачи сообщения по гидроакустическому каналу от менеджера групповой миссии центральному узлу):

1. менеджер групповой миссии публикует IPC-сообщение для гидроакустического модема в локальной сети АНПА;
2. модем АНПА получает IPC-сообщение и передаёт его как соответствующий пакет;
3. модем СПО принимает пакет, и драйвер модема публикует IPC-сообщение в локальной сети СПО.

Драйвер модема также отвечает за создание устойчивого канала связи (канальный уровень). Предполагается, что программа, посылающая сообщение, получает от драйвера либо подтверждение того, что сообщение доставлено, либо отказ.

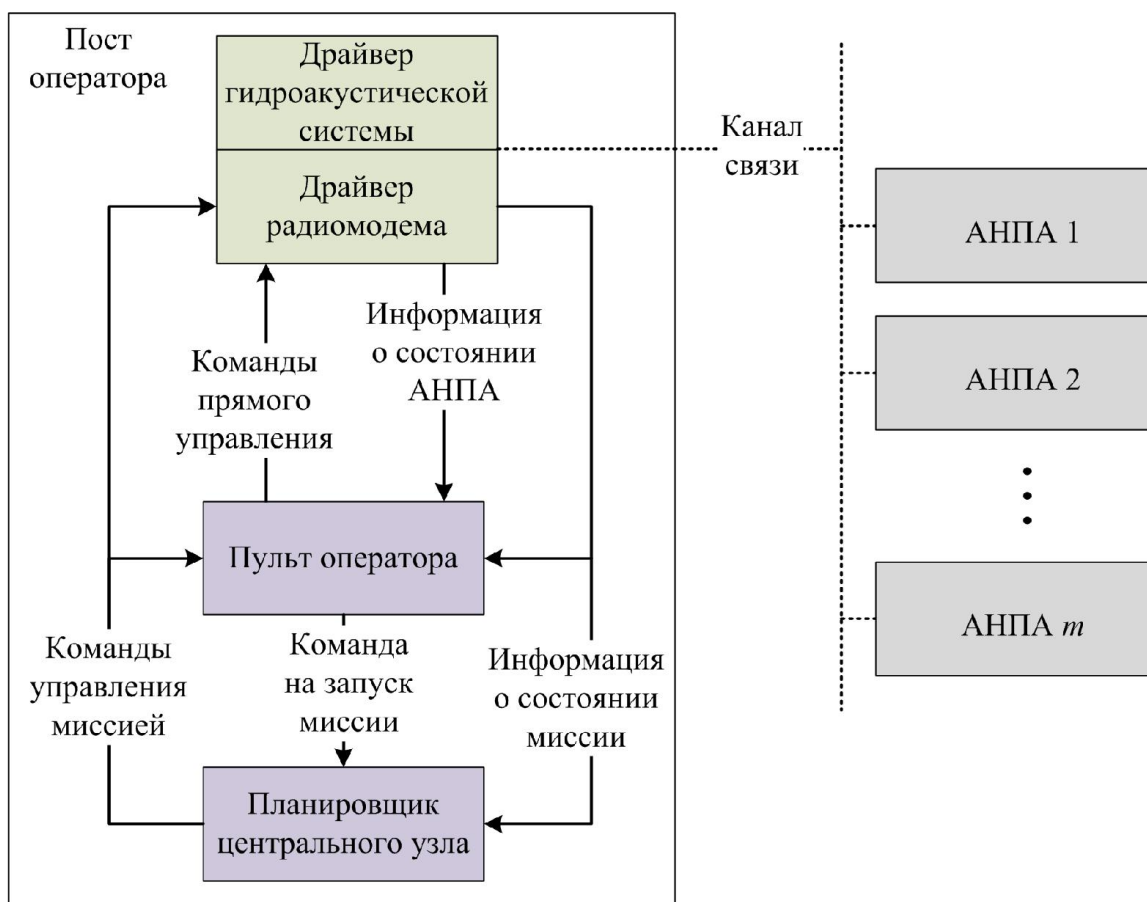


Рис. 29. Общая структура СПУ.

### 5.2.2 Средства обеспечения групповой работы в СПУ

Групповая работа реализуется благодаря взаимодействию двух программ: планировщика на центральном узле и менеджера групповой миссии на каждом АНПА.

Имеется несколько типов сообщений, которыми обмениваются планировщик и менеджер миссии. Сообщения сведены в таблице 4. Предполагается, что каждый АНПА снабжён уникальным числовым идентификатором – адресом. В каждом сообщении присутствует поле адреса.

Рассмотрим подробнее алгоритм работы планировщика. Он принимает на вход описание миссии и работает до тех пор, пока все задания не будут выполнены. Планировщик хранит в оперативной памяти информацию обо всех АНПА, участвующих/участвовавших в миссии и о каждом задании. Для каждого задания хранится его статус (выполнено, выполняется, ожидает выполнения) и идентификатор АНПА, занятого в его выполнении. Для каждого АНПА хранится его план и текущее состояние этого плана.

Таблица 4. Сообщения между планировщиком и менеджером миссии АНПА.

Идентификатор	Направление	Описание
MSG_VEHICLE_CAPS	к планировщику	Сообщает о готовности АНПА присоединиться к миссии. Содержит информацию о параметрах движения АНПА и исправности его бортового оборудования.
MSG_VEHICLE_AWAY	к планировщику	Сообщает, что АНПА выходит из состава миссии, например по причине поступления команды телеуправления или по сообщению своей контрольно-аварийной системы.
MSG_VEHICLE_STATE	к планировщику	Периодическое сообщение, говорящее о том, что аппарат, находящийся в составе миссии, выполняет свой план. Содержит информацию о состоянии аппарата.
MSG_TASK_DONE	к планировщику	Сообщает о том, что АНПА выполнил очередное задание. Содержит идентификатор выполненного задания.
MSG_TASK_START	к планировщику	Сообщает о том, что АНПА приступил к выполнению очередного задания. Содержит идентификатор задания.
MSG_PLAN	от планировщика	Содержит перечисление заданий в том порядке, в котором их следует выполнить. Каждое задание определяется своим типом, параметрами и числовым идентификатором.

Кроме того, хранится список АНПА, которым не удалось отправить их план. Эти планы периодически переотправляются.

Основу планировщика составляет цикл обработки сообщений. Этот цикл выглядит следующим образом:

1. Проверить наличие новых сообщений.
2. Обновить состояние заданий, если пришли сообщения MSG\_TASK\_DONE или MSG\_TASK\_START.
3. Проверить, обновился ли состав группы: пришло сообщение MSG\_VEHICLE\_AWAY от аппарата в группе, или пришло сообщение MSG\_VEHICLE\_CAPS от аппарата не в группе или сообщение MSG\_VEHICLE\_STATE не приходило в течение определённого времени от одного из аппаратов в группе.
4. Если состав группы обновился, или один из аппаратов группы закончил выполнение своего плана, выполнить перепланирование и разослать планы всем аппаратам группы, используя сообщение MSG\_PLAN.
5. Если список неотправленных планов не пуст, то отправить заново те планы из списка, для которых истекло время ожидания повторной отправки. Обновить список.

Рассмотрим теперь алгоритм работы менеджера групповой миссии. Он запущен на каждом АНПА группы и хранит информацию об имеющемся плане и его состоянии. Всё время, пока запущен менеджер групповой миссии, аппарат либо находится в составе группы, либо пытается к ней присоединиться. Также как и в планировщике, поддерживается список сообщений, которые отправить не удалось. Периодически эти сообщения отправляются. В списке всегда присутствует либо сообщение MSG\_VEHICLE\_STATE (если аппарат находится в составе группы), либо сообщение MSG\_VEHICLE\_CAPS (если аппарат не находится в группе). Цикл обработки сообщений менеджера групповой миссии выглядит следующим образом:

1. Проверить наличие новых сообщений.

2. Если получено сообщение от пульта оператора о выходе из групповой миссии, то отправить сообщение MSG\_VEHICLE\_AWAY и выйти из цикла.
3. Если аппарат не находится в составе группы, перейти к пункту 8.
4. Если получено сообщение MSG\_PLAN, обновить план. Считать, что АНПА находится в составе группы.
5. Если получено сообщение от регуляторов о выполнении текущего задания, отправить сообщение MSG\_TASK\_DONE. Если выполнено последнее задание в списке, считать АНПА вышедшим из состава группы.
6. Если получено сообщение от регуляторов о выполнении текущего задания или план обновился, приступить к переходу в начальную точку нового задания.
7. Если получено сообщение от регуляторов о достижении начальной точки текущего задания, то подать регуляторам команду для выполнения задания и отправить сообщение MSG\_TASK\_START.
8. Отправить сообщения, для которых истекло время повторной отправки. Если отправлено MSG\_VEHICLE\_CAPS или MSG\_VEHICLE\_STATE, то вернуть в очередь одно из них, в зависимости от принадлежности АНПА группе.

Описанные алгоритмы работы менеджера групповой миссии и планировщика, равно как и форматы передаваемых сообщений учитывают, что связь с АНПА как правило затруднена (когда аппарат находится под водой, единственным каналом связи становится относительно медленный и ненадёжный гидроакустический канал). Используется набор небольших сообщений (десятки байт), а в случае повторной отправки сообщения, разрыв между двумя повторными отправками ограничен снизу. При этом радиус действия систем гидроакустической связи, как правило, ограничен единицами километров (см. [51]). Для того чтобы отличать АНПА, вышедший из строя, от аппарата, вышедшего за радиус действия связи, возможны следующие выходы: использовать относительно большую задержку для принятия решения о потере аппарата; обеспечить связь, используя мобильный гидроакустический модем на



базе автономного водного аппарата /АНВА/; принимать решение в соответствии с моделью связи. Предлагаемая модель использования центрального узла вовсе не означает, что передача данных физически возможна лишь между АНПА и СПО. Могут быть использованы более сложные пути передачи данных на основе методов маршрутизации в мобильных сетях [91].

Для передачи заданий в сообщении MSG\_PLAN используется кодирование передаваемой последовательности заданий. Каждое задание характеризуется набором аргументов. К примеру, простейшее задание «проход по отрезку» может быть закодировано следующим образом:

- координаты начальной точки (два числа по 4 байта);
- координаты конечной точки (два числа по 4 байта);
- флаг стабилизация глубины/высоты и сама глубина/высота (2 байта);
- требуемая скорость (1 байт).

Таким образом, описание одного простейшего задания может быть закодировано 19 байтами. Более плотная упаковка (например, кодирование конечной точки отрезка парой целых двухбайтных чисел, задающих её смещение относительно начальной точки в метрах; кодирование глубины/высоты и скорости в двух байтах), позволяет закодировать задание, используя меньшее количество байт. Следует отметить, что при передаче данных через канал связи к сообщению добавляется служебная информация. Планировщик осуществляет кодирование каждого задания при считывании файла с описанием миссии, который представляет собой текстовое описание заданий.

### **5.3. Испытания СПУ в составе АНПА «МАРК»**

Летом 2011 года в реальных условиях была испытана часть системы, обеспечивающая работу одиночного аппарата [6]. В 2013 году были проведены испытания всего комплекса «МАРК», включающего подводный и водный НПА. Испытания проводились с 24 августа по 20 сентября в бух. Алексеева на о. Попова залива Петра Великого.

Для управления обоими аппаратами использовалась описанная выше СПУ. В запусках, произведённых во время испытаний, не использовалось разделение

общих задач между аппаратами и планирование, однако для каждого аппарата в отдельности был применён механизм формирования и передачи миссии, описанный выше. Рассматривались элементарные задания, каждое из которых представляет собой единственную команду регулятора. Одновременная работа с двумя аппаратами осуществлялась с поста оператора, расположенного на берегу, с использованием радиомодемов. Гидроакустическая связь не использовалась. Ниже приводятся результаты запусков АНПА и АНВА в отдельных миссиях.

### 5.3.1. Миссия «меандр»

Миссия «меандр» заключалась в покрытии квадрата размером  $100 \times 100$  м меандром с шагом 25 м. При этом устанавливалась целевая глубина в 1 м и целевая скорость в 1 м/с.

Текстовое описание миссии, поданное на вход планировщику, представлено на рис. 30. Планировщик сформировал сообщение MSG\_PLAN, не изменяя порядка выполнения заданий, и отправил его на аппарат по радиомодему, после чего АНПА приступил к выполнению плана. Параметр «callsign» в начале текстового описания обозначает идентификатор аппарата, которому следует доставить сообщение MSG\_PLAN (во время испытаний посту оператора был присвоен идентификатор 1, АНПА – 2, а АНВА – 3). Далее следует описание команд. Идентификатор каждой команды указан в квадратных скобках. Параметр «type» означает тип выполняемого задания («tack\_p2p» – проход по отрезку). Далее следуют параметры, специфичные для данного задания:  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $x_2$ ,  $y_2$  – начальная и конечная точки отрезка в метрах, *velocity* – скорость в метрах в секунду, *stab\_mode* – режим вертикальной стабилизации (глубина/высота), *depth* – целевая глубина в метрах (небольшая отрицательная целевая глубина используется для хождения аппарата по поверхности).

Траектория, полученная в процессе выполнения миссии по данным бортовой системы счисления пути, изображена на рис. 31 (использовался компас и доплеровский лаг). Навигационная система АНПА использует ориентацию глобальной системы координат, при которой ось  $x$  направлена на север, а ось  $y$  – на восток. На графике, изображающем траекторию аппарата, оси обозначены

именно по этому принципу. К примеру, первый галс АНПА производится из точки (0; 0) на север, а выполнение всей миссии завершается в точке (100, -100) к северо-западу от стартовой позиции.

```
callsign = 2                                x2 = 100.0
                                             y2 = -50.0
[01]                                         velocity = 1.0
type = tack_p2p                             stab_mode = depth
x1 = 0.0                                    depth = 1.0
y1 = 0.0
x2 = 100.0                                  [04]
y2 = 0.0                                    type = tack_p2p
velocity = 1.0                              x1 = 100.0
stab_mode = depth                          y1 = -75.0
depth = 1.0                                 x2 = 0.0
                                             y2 = -75.0
[02]                                         velocity = 1.0
type = tack_p2p                             stab_mode = depth
x1 = 100.0                                  depth = 1.0
y1 = -25.0
x2 = 0.0                                  [05]
y2 = -25.0                                 type = tack_p2p
velocity = 1.0                              x1 = 0.0
stab_mode = depth                          y1 = -100.0
depth = 1.0                                 x2 = 100.0
                                             y2 = -100.0
[03]                                         velocity = 1.0
type = tack_p2p                             stab_mode = depth
x1 = 0.0                                    depth = 1.0
y1 = -50.0
```

Рис. 30. Текстовое описание миссии «меандр».

На основе записей менеджера групповой миссии было установлено время, которое потребовалось для выполнения каждого задания. Сравнение полученной диаграммы с оценкой на основе кинематической модели представлено на рис. 32. Для выполнения каждого из галсов и переходов между ними потребовалось 100 с,

31 с, 117 с, 31 с, 116 с, 31 с, 118 с, 33 с, 123 с, (перечисление идёт в порядке выполнения). Расхождение объясняется тем, что кинематическая модель не учитывает динамической стороны явления. Такое расхождение может быть исправлено при планировании. Для этого достаточно получать оценки  $d(\mathbf{a}, \mathbf{b})$  в выражении (1) исходя из динамической модели АНПА, взяв в качестве  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  не просто точки пространства, а векторы состояния, включающие курс аппарата. Среди других причин: несовершенство бортовой системы счисления пути и величина окрестности целевой точки, при попадании в которую СПУ считает точку достигнутой.

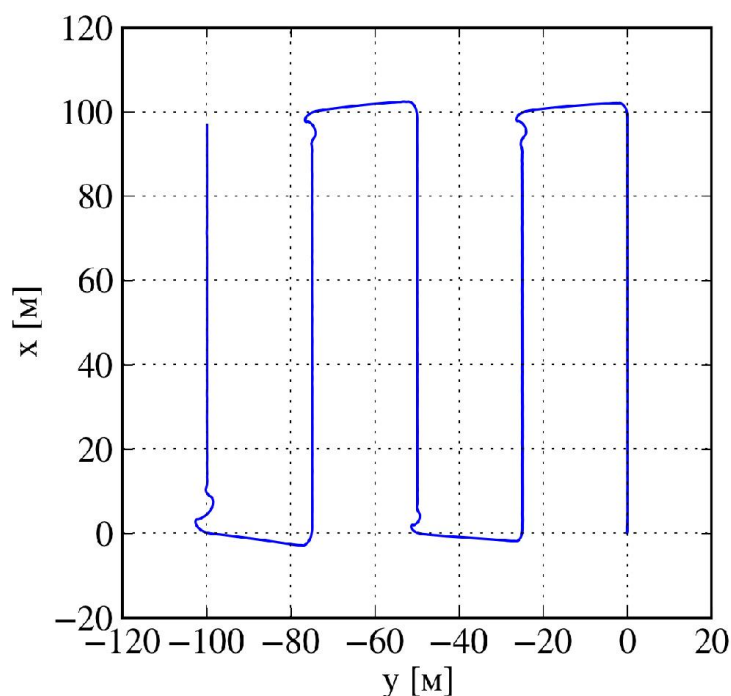


Рис. 31. Траектория АНПА при выполнении миссии «меандр» (по данным бортовой системы счисления пути).

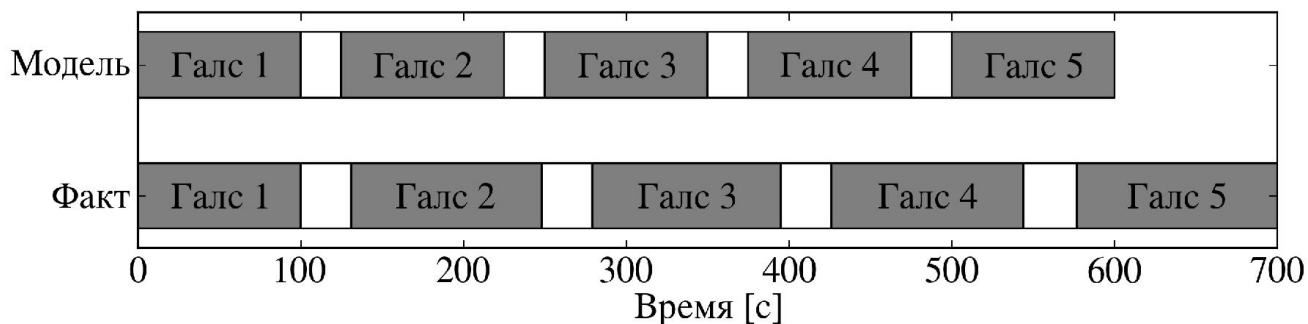


Рис. 32. План миссии «меандр». Сравнение времени, затраченного на выполнение каждого задания, с оценкой на основе кинематической модели.

### 5.3.2. Миссия «квадрат»

Миссия «квадрат» представляет собой последовательность из четырёх галсов длины по 100 м, каждый из которых повернут на 90° относительно предыдущего. Поддерживалась скорость в 1 м/с и глубина 0 м. Таким образом, при выполнении данной миссии поддерживалась радиосвязь между АНПА и постом оператора на берегу.

```
callsign = 2                                [03]
                                             type = tack_p2p
[01]                                         x1 = 100.0
type = tack_p2p                               y1 = -100.0
x1 = 0.0                                       x2 = 0.0
y1 = 0.0                                       y2 = -100.0
x2 = 100.0                                    velocity = 1.0
y2 = 0.0                                       stab_mode = depth
velocity = 1.0                                depth = 0.0
stab_mode = depth
depth = 0.0
                                             [04]
                                             type = tack_p2p
[02]                                         x1 = 0.0
type = tack_p2p                               y1 = -100.0
x1 = 100.0                                    x2 = 0.0
y1 = 0.0                                       y2 = 0.0
x2 = 100.0                                    velocity = 1.0
y2 = -100.0                                   stab_mode = depth
velocity = 1.0                                depth = 0.0
stab_mode = depth
depth = 0.0
```

Рис. 33. Текстовое описание миссии «квадрат».

Текстовое описание миссии, поданное на вход планировщику, представлено на рис. 33. Миссия начинается и заканчивается в точке (0; 0), обход квадрата осуществляется против часовой стрелки (если смотреть сверху). Траектория, полученная в процессе выполнения миссии по данным бортовой системы счисления пути, изображена на рис. 34. Сравнение модельного плана и

фактического представлено на рис. 35. Для выполнения каждого задания потребовалось 108 с, 117 с, 116 с и 119 с соответственно.

Планировщик, запущенный на посту оператора, зафиксировал приём сообщений MSG\_TASK\_DONE и MSG\_TASK\_START в порядке, указанном в таблице 5. Серым цветом отмечены дубликаты сообщений, полученные из-за несовершенства используемого протокола. Несмотря на наличие дубликатов, состояние заданий (не начато, начато, окончено) поддерживалось в памяти планировщика верно.

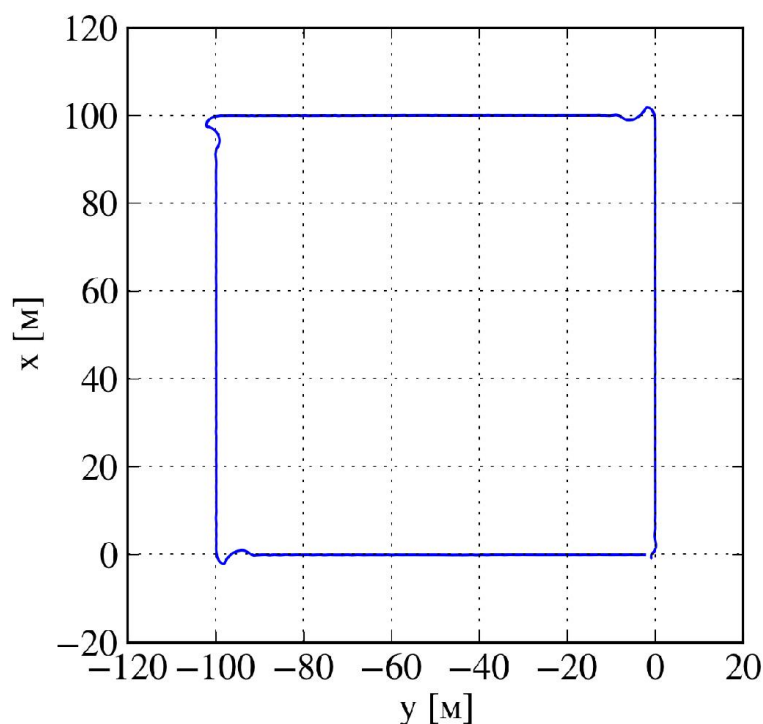


Рис. 34. Траектория АНПА при выполнении миссии «квадрат» (по данным бортовой системы счисления пути).

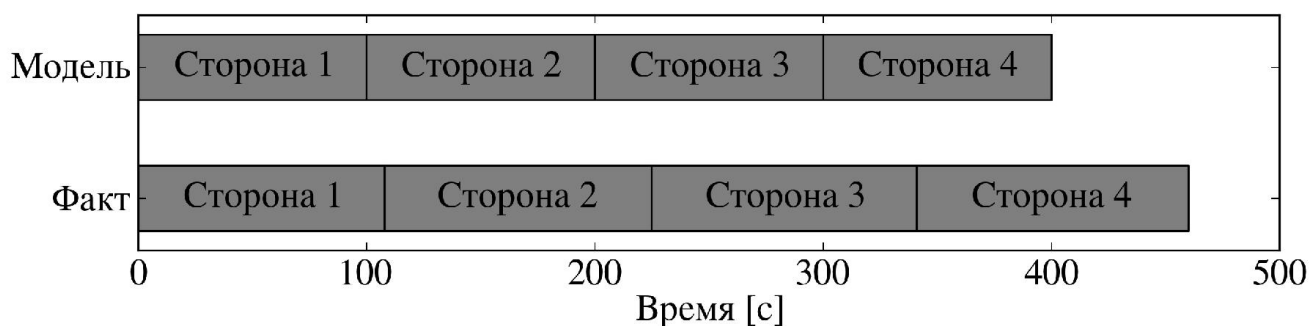


Рис. 35. Сравнение времени, затраченного на выполнение каждого задания, с оценкой на основе кинематической модели.

Таблица 5. Сообщения MSG\_TASK\_DONE и MSG\_TASK\_START, полученные планировщиком во время выполнения миссии.

Время (от начала суток)	Тип сообщения	Идентификатор аппарата	Идентификатор задания
15:11:53.116	MSG_TASK_START	2	1
15:12:08.641	MSG_TASK_START	2	1
15:13:46.581	MSG_TASK_DONE	2	1
15:13:46.587	MSG_TASK_START	2	2
15:15:39.772	MSG_TASK_DONE	2	2
15:15:39.777	MSG_TASK_START	2	3
15:15:41.444	MSG_TASK_DONE	2	2
15:15:41.449	MSG_TASK_START	2	3
15:17:39.234	MSG_TASK_DONE	2	3
15:17:39.239	MSG_TASK_START	2	4
15:19:31.927	MSG_TASK_DONE	2	4

### 5.3.3. Миссия «зигзаг»

Миссия «зигзаг» была запущена на АНВА и заключалась в перемещении по отрезкам длиной 100 м и 200 м, поворачивающим попеременно то влево, то вправо. При этом была задана целевая скорость 2,25 м/с.

Текстовое описание миссии, поданное на вход планировщику, представлено на рис. 36. Миссия состоит из «точечных заданий», требующих посещения точек с заданными координатами. Параметр «callsign = 3» в начале текстового описания миссии свидетельствует, что этот план будет отправлен АНВА. Траектория, полученная в процессе выполнения миссии по данным спутниковой

навигационной системы, изображена на рис. 37. Сравнение модельного плана и фактического представлено на рис. 38. Различие модельного плана и фактического, помимо динамических эффектов, объясняется также следующими причинами:

- отсутствие регулятора скорости у АНВА (используется соответствие между величиной упора и скоростью);
- систематическая ошибка компаса и влияние внешней среды, благодаря которым аппарат описывает дугу на тех участках, где программная траектория представляет собой прямолинейный отрезок;
- «перелёты» через целевую точку (как это произошло по истечении первого галса), обусловленные недостатками настроек нижнего уровня СПУ.

```
callsign = 3                                [04]
                                             type = tack_xy
[01]                                         x = 300.0
type = tack_xy                               y = -400.0
x = 100.0                                    velocity = 2.25
y = 0.0
velocity = 2.25                               [05]
                                             type = tack_xy
[02]                                         x = 500.0
type = tack_xy                               y = -400.0
x = 100.0                                    velocity = 2.25
y = -200.0
velocity = 2.25

[03]
type = tack_xy
x = 300.0
y = -200.0
velocity = 2.25
```

Рис. 36. Текстовое описание миссии «зигзаг».



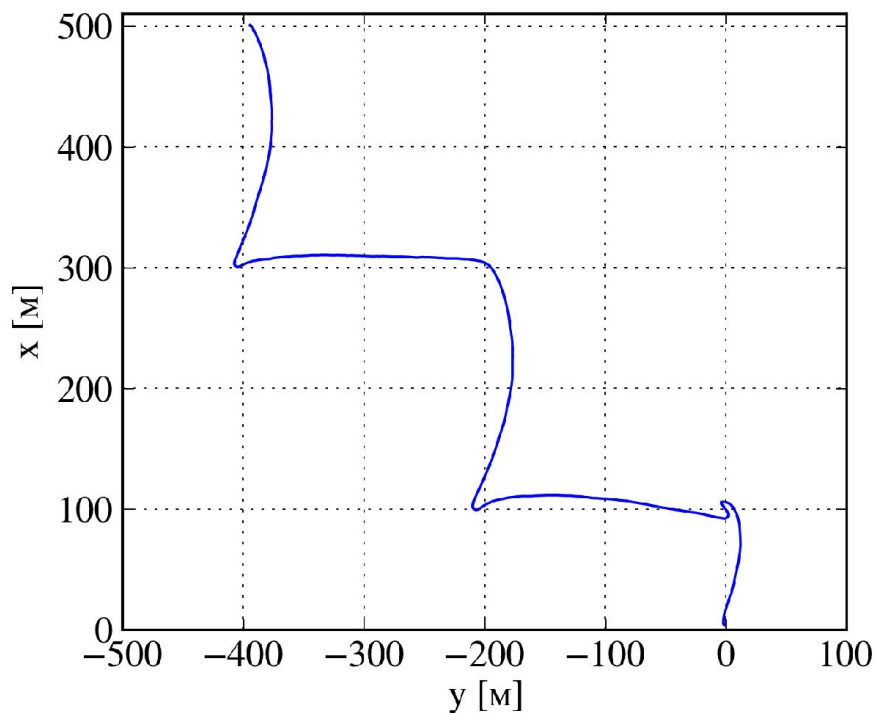


Рис. 37. Траектория АНВА при выполнении миссии «зигзаг» (по данным спутниковой навигационной системы).

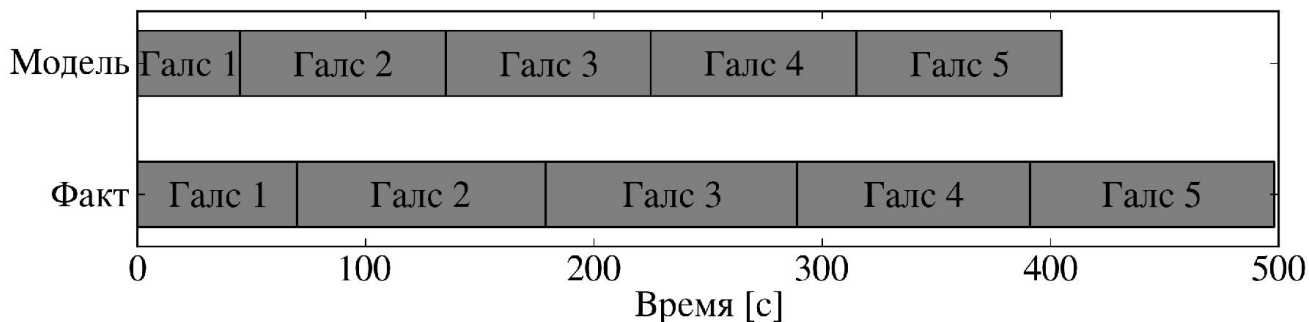


Рис. 38. Сравнение времени, затраченного на выполнение каждого задания, с оценкой на основе кинематической модели.

#### 5.4. Выводы

Разработан комплекс программ, реализующий методы и алгоритмы решения обзорно-поисковых задач, предназначенный для проведения вычислительного эксперимента, а также для установки и испытания на борту АНПА. Комплекс содержит реализации разработанных алгоритмов планирования миссии, предоставляет средства для имитационного моделирования работы группы аппаратов при измерении параметров морской среды. Данный комплекс был

использован для проведения вычислительных экспериментов, описанных в настоящей работе.

Элементы разработанного комплекса вошли в систему централизованного управления, внедрённую в СПУ АНПА и АНВА «МАРК». В морских условиях произведены испытания и подтверждена работоспособность способа формирования и передачи миссии аппарату.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена математическая модель задачи планирования в группе АНПА. Модель предполагает разбиение общего задания на набор неделимых заданий и позволяет учитывать положения аппаратов и различные способы выполнения неделимых заданий.
2. Разработаны алгоритмы решения задачи оптимального планирования в рамках предложенной модели: точный – на основе алгоритма Хельда-Карпа и приближённый - на основе аукционного метода.
3. Разработан и исследован метод съёмки параметров водной среды с заданной точностью на основе применения группы АНПА. Метод использует формирование траектории типа «меандр с переменным шагом» и позволяет повысить эффективность съёмки при изучении нестационарных процессов.
4. Разработан и исследован метод поиска и обследования локальных неоднородностей водной среды на основе использования группы АНПА. Метод позволяет существенно повысить эффективность локализации неоднородностей, а также оценить объем и количество растворённого в них вещества.
5. Разработан комплекс программ, реализующий методы и алгоритмы решения обзорно-поисковых задач, предназначенный для проведения вычислительного эксперимента, а также для установки и испытания на борту АНПА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев М.Д., Киселёв Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.; под общ. ред. М.Д. Агеева Автономные подводные роботы: системы и технологии. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Амбарцумян А.А., Потехин А.И. Групповое управление в дискретно-событийных системах // Проблемы управления. – 2012. – №5. – С. 46–53.
3. Бабак Л.Н., Щербатюк А.Ф. Некоторые методы оценивания состояния водных акваторий с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2010. – №5. – С. 74–78.
4. Бабак Л.Н., Щербатюк А.Ф. Об одном алгоритме поиска источника подводного шлейфа, основанном на использовании группы АНПА // Управление большими системами. – 2010. – Вып. 30.1. – С. 536–548.
5. Бычков И.В., Максимкин Н.Н., Хозяинов И.С., Киселёв Л.В. О задаче патрулирования границы акватории, охраняемой группой подводных аппаратов // Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток, 2013. – С. 424–428.
6. Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Кушнерик А.А., Туфанов И.Е., Щербатюк А. Ф. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – №6. – С. 59–65.
7. Дубровин Ф.С., Непостаев Е.И., Сураев Н.В., Денисенко М.В., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Навигационно-управляющий комплекс автономного необитаемого подводного аппарата для выполнения групповых операций // Материалы 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления. Локальная научно-техническая конференция «Управление в распределенных сетевых и мультиагентных системах». – Геленджик, 2011. – С. 346–350.

8. Дубровин Ф.С., Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат для выполнения групповых операций на шельфе // Материалы XII Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований». – Москва, 2011. – Т. 2 – С. 66–69.
9. Дулепов В.И., Щербатюк А.Ф. Современные технические средства в подводных экологических исследованиях. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 164 с.
10. Дюбрул О. Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных [пер. с англ. Е. В. Ковалевский, ред. перевода Г. Н. Гогоненков]. – European Association of Geoscientists & Engineers; EAGE Publications, 2002. – 296 с.
11. Зак Ю.А. Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». – 2012. – 394 с.
12. Инзарцев А.В., Киселёв Л.В., Медведев А.В., Павин А.М., Севрюк А.В., Сенин Р.А., Бобков В.А., Борисов Ю.С., Мельман С.В. Имитационный моделирующий комплекс для «интеллектуального» автономного подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. – №2. – 2009. – С. 46–52.
13. Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В. Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – №1(15). – С. 4–16.
14. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
15. Капустян С.Г. Алгоритмы коллективного улучшения плана при решении задачи распределения целей в группе роботов // Искусственный интеллект – 2006. – №3. – С. 679–690.

16. Киселёв Л.В., Инзарцев А.В., Бычков И.В. и др. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. – 2009. – №2(8). – С. 34–43.
17. Киселёв Л.В., Медведев А.В. Модели динамики и алгоритмы управления движением автономного подводного робота при траектории обследования аномальных физических полей // Подводные исследования и робототехника. – 2011. – №1(11). – С. 24–31.
18. Корепанов В.О., Новиков Д.А. Задача о диффузной бомбе // Проблемы управления. – 2011. – № 5. – С. 66–73.
19. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2001. – 960 с.
20. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
21. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Крюченков Е.Н., Кучерский Р.В., Диане С.А. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – №2. – С. 22–32.
22. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – №3. – С. 11–16.
23. Максимкин Н.Н., Нагул Н.В. Децентрализованное распределение группы АНПА по областям с приоритетами // Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток, 2013.– С. 414–418.
24. Морозов М.А., Туфанов И.Е. Графический моделирующий комплекс для автономного необитаемого подводного аппарата // Graphicon-2013, 23rd

- International Conference on Computer Graphics and Vision, 2013, Vladivostok, Russia.
25. Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. – М.: Физматлит, 2008. – 188 с.
  26. Подлипьян П.Е., Максимов Н.А. Многофазный алгоритм решения задачи планирования полета группы беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. – Вып. 43. – 2011.
  27. Туфанов И.Е. Разработка системы централизованного управления группой АНПА // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №7. – С. 65–70.
  28. Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Об алгоритмах высокоточного измерения параметров водной среды, основанных на использовании группы АНПА // Управление большими системами. – 2013. – вып. 43. – С. 254–270.
  29. Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Об одном алгоритме обследования локальных неоднородностей морской среды с использованием группы АНПА // Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток, 2011.– С. 371–375.
  30. Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф. Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды // Управление большими системами. – 2012. – вып. 36. – С. 262–284.
  31. Ульянов С.А., Козлов Р.И., Максимкин Н.Н., Киселёв Л.В. Управление групповой конфигурацией автономных подводных аппаратов при траекторном обследовании заданной акватории // Материалы пятой Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток, 2013.– С. 419–423.
  32. Юревич Е.И. О проблеме группового управления роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. – №2. – 2004.

33. Юревич Е.И. Основы робототехники: учеб. пособие. – 3-е изд., перераб. И доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 368 с.
34. Anderson T., Barrett N., Hill N., Nichol S., Seiler J., Williams S. Autonomous underwater vehicle (AUV) for mapping marine biodiversity in coastal and shelf waters: implications for marine management // Proceedings of the OCEANS 2010 MTS/IEEE Conference, 2010, Sydney, Australia.
35. Applegate D.L. The Traveling Salesman Problem / Applegate D.L., Bixby R.E., Chvátal V., Cook W.J. – Princeton University Press, 2006. – 593 p.
36. Batalin M.A., Sukhtame G.S. Sensor Network-based Multi-Robot Task Allocation // IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), 2003, Las Vegas, USA. – P. 1939-1944.
37. Bellingham J.G., McEwen R.S., Ryan J.P., Zhang Y. An adaptive triggering method for capturing peak samples in a thin phytoplankton layer by an autonomous underwater vehicle // Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference, 2009, Bremen, Germany.
38. Benjamin M.R. Interval programming: a multi-objective optimization model for autonomous vehicle control: Doctoral Dissertation. – Brown University Providence, RI, USA. – 2002. – 130 p.
39. Benjamin M., Schmidt H., Newman P., Leonard J. Nested Autonomy for Unmanned Marine Vehicles with MOOS-IvP // Journal of Field Robotics. – 2010. – Vol. 27. – Iss. 6. – P. 834–875.
40. Blidberg D.R. The development of autonomous underwater vehicles (AUVs): a brief summary // IEEE International Conference on Robotics and Automation 2001, Seoul, Korea. – 12 p.
41. Brumitt B.L., Stentz A. GRAMMPS: a generalized mission planner for multiple mobile robots in unstructured environments // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, Leuven, Belgium – Vol. 2 – P. 1564-1571.
42. Caiti A., Casalino G., Munafò A., Tureta A. Cooperating AUV Teams: Adaptive Area Coverage With Space-Varying Communication Constraints //



- Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference, 2009, Bremen, Germany.
43. Caiti A., Munafò A., Viviani R. Adaptive on-line planning of environmental sampling missions with a team of cooperating autonomous underwater vehicles // *International Journal of Control.* – 2007. – Vol. 80, No. 7. – P. 1151–1158.
  44. Cannel C.J., Gadre A.S., Stilwell D.J. Boundary Tracking and Rapid Mapping of A Thermal Plume Using an Autonomous Vehicle // *Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference, 2006, Boston, USA.* – P. 1–6.
  45. Cannel C.J., Stilwell D.J. A comparison of two approaches for adaptive sampling of environmental processes using autonomous underwater vehicles // *Proceedings of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference, 2005, Washington, USA.* – Vol. 2 – P. 1514–1521.
  46. Carignan K.S., Taylor L.A., Eakins B.W., Warnken R.R., Sazonova T., and Schoolcraft D.C. Digital Elevation Model of Monterey, California: Procedures, Data Sources and Analysis / NOAA, 2009. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/dem/squareCellGrid/getReport/414> (дата обращения: 01.06.2013).
  47. Chance T.S. et al. The Hugin 3000 AUV // *Sea Technology.* – December 2000. – P. 10–14.
  48. Chance T.S., Kleiner A.A., Lee J., Northcutt J.G. Cable route surveys utilizing Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) // *MTS Journal.* – 2000. – Vol. 34, No. 3. – P. 11–16.
  49. Chatty A., Kallel I., Alimi A.M. Counter-Ant Algorithm for Evolving Multirobot Collaboration // *Proceedings of the 5th international conference on Soft computing as transdisciplinary science and technology, Cegry-Pontoise, France, 2008.* – P. 84–89.
  50. Chitre M. DSAAV – A distributed software architecture for autonomous vehicles // *Proceedings of the OCEANS 2008 MTS/IEEE Conference, 2008, Quebec City, Canada.*

51. Chitre M., Shahabodeen S., Stojanovic M. Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges // Marine Technology Society Journal. – 2008. – Vol. 42, No. 1. – P. 103–116.
52. Chow B., Clark C.M., Huisson J.P. Assigning Closely Spaced Targets to Multiple Autonomous Underwater Vehicles // Proceedings of 16th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST09), 2009, Durham, USA.
53. Clarke M.E., Ferrini V.L., Singh H., Wakefield W., York K. Computer-assisted analysis of near-bottom photos for benthic habitat studies // Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference, 2006, Boston, USA.
54. Cook W.J. In Pursuit of the Travelling Salesman: Mathematics at the Limits of Computation. – Princeton University Press, 2012. – 228 p.
55. Crimmins D., Deacutis, C., Hinchey E., Chintala, M. Use of a long endurance solar powered autonomous underwater vehicle (SAUV II) to measure dissolved oxygen concentrations in Greenwich Bay, Rhode Island, U.S.A // Proceedings of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference, 2005, Brest, France. – Vol. 2 – P. 896–901.
56. Dahl T.S., Mataric M.J., Sukhtame G.S. Multi-Robot Task-Allocation through Vacancy Chains // Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'03), 2003, Taipei, Taiwan. – P. 2293–2298.
57. Delande J, Balasubramanian R. Task Consensus among a Team of Heterogeneous AUVs under Intermittent Communication // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
58. Denisenko M., Dubrovin F., Mun S., Nepostaev E., Suraev N., Tuphanov I, Vaulin Y. Control System of Small AUV for Multiple Vehicle Operation // Proceedings of the international conference and exhibition «Underwater Intervention 2011». – New Orleans, USA, 2011. – P. 1–5.
59. Demarco K., West M.E., Collins T.R. An implementation of ROS on the Yellowfin autonomous underwater vehicle (AUV) // Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, 2011, Kona, USA.

60. Dias H., Calado P., Bencatel R., Gomes R., Ferreira S., Sousa J. Operations with multiple unmanned systems // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012, Vilamoura, Portugal.
61. Dias M.B., Zlot R., Kalra N., Stentz A. Market-Based Multirobot Coordination: A Survey and Analysis // Proceedings of the IEEE. – Vol. 94, Issue 7. – 2006. – P. 1257–1270.
62. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization // IEEE Computational Intelligence Magazine. – Vol. 1, Issue 4. – 2006. – P. 28–39.
63. Dubins L.E. On curves of minimum length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal position and tangents // American Journal of Mathematics. – 1957. – Vol. 79, No. 3. – P. 497–516.
64. Farrell J.A., Li W., Pang Sh., Arrieta R. Chemical Plume Tracing Experimental Results with a REMUS AUV // Proceedings of the Oceans 2003 MTS/IEEE Conference, 2003, San Diego, USA. – P. 962-968.
65. Fiorelli E., Leonard N.E., Bhatta P., Paley D., Bachmayer R., Fratantoni D.M. Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – Vol. 31, Issue 4. – 2006. – P. 935–948.
66. Furcy D., Tomas G. Designing Effective Heterogeneous Teams for Multiagent Routing Domains // 2011 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT), 2011, Lyon, France. – Vol. 2 – P. 341–348.
67. Gagne D., Rode S. Turner R.M. Distributed, context-based organization and reorganization of multi-AUV systems // Proceedings of the 18th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, 2013, Portsmouth, USA.
68. Gerkey B.P., Mataric M.J. A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems // The International Journal of Robotics Research – 2004. – Vol. 23, no. 9. – P. 939–954.

69. Held M., Karp R. A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – Vol. 10, No. 1. – 1962. – P. 196–210.
70. Hoeing M., Dasgupta P. Dynamic Pricing Algorithms for Market based Distributed Task Selection in Multi-agent Swarms // Proc. IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT'06), Hong Kong. – 2006. – P. 113–116.
71. Hoeing M., Dasgupta P., Petrov P. et al Auction-based multi-robot task allocation in COMSTAR // Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, 2007, Honolulu, USA.
72. Hong-Jian W., Lin-Lin W., Juan L. et al Autonomous Team Mission Planning for AUVs // Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, 2011, Kona, USA.
73. Hurtado J.E., Robinett R.D., Dohrmann C.R., Goldsmith S.Y. Decentralized control for a swarm of vehicles performing source localization // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – Vol. 41, Issue 1. – 2004. – P. 1–18.
74. Insaurralde C.C., Petillot Y.R. Intelligent Autonomy for Collaborative Intervention Missions of Unmanned Maritime Vehicles // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
75. Jung Y.S., Lee K.W., Lee B.H. Advances in Sea Coverage Methods Using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) // Recent Advances in Multi Robot Systems. – I-Tech Education and Publishing, 2008. – P. 69–100.
76. Leonard N.E., Fiorelli E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups // Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control, 2001. – Vol. 3. – P. 2968–2973.
77. Low K.H., Dolan J.M., Khosla P. Adaptive Multi-Robot Wide-Area Exploration and Mapping // Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, 2008, Estoril, Portugal. – Vol. 1. – P. 23–30.

78. Marthiniussen R., Vestgard K., Klepaker R.A., Storkersen N. HUGIN-AUV concept and operational experiences to date // Proceedings of the OCEANS 2004 MTS/IEEE Conference, 2004, Kobe, Japan. – Vol. 2 – P. 846–850.
79. Martins R., Dias P.S., Marques E.R.B., Pinto J., Sousa J.B., Pereira F.L. IMC: A communication protocol for networked vehicles and sensors // Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference, 2009, Bremen, Germany.
80. Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence / под ред. Weiss G.: Massachusetts Institute of Technology, 1999. – 619 p.
81. Ortiz C.L., Vincent R., Morisse B. Task Inference and Distributed Task Management in the Centibots Robotic System // Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, 2005, Utrecht, Netherlands. – P. 860–867.
82. Parker L.E. ALLIANCE: an architecture for fault tolerant multirobot cooperation // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1998. – Vol. 14, Issue 2. – P. 220–240.
83. Perry R.L., DiMarco S.F., Walpert J., Guinasso N.L. Jr., Knap A. Glider Operations in the Northwestern Gulf of Mexico: The design and implementation of a glider network at Texas A&M University // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
84. Perry R.L., Jochens A.E., Howard M.K. Gliders in the Gulf of Mexico: Building towards an operational and integrated observing system in the Gulf of Mexico // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
85. Pfingsthorn M., Birk A., Vaskevicius N., Pathak K. Cooperative 3D Mapping Under Underwater Communication Constraints // Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, 2011, Kona, USA.
86. Pinto J., Calado P., Braga J., Dias P., Martins R., Marques E., Sousa J. Implementation of a control architecture for networked vehicle systems // IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV 2012), 2012, Porto, Portugal.


87. Pinto J., Faria M., Fortuna J. et al Chasing Fish: Tracking and control in a autonomous multi-vehicle real-world experiment // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
88. Prins R., Kandemir M. Time-constrained optimization of multi-AUV cooperative mine detection // Proceedings of the OCEANS 2008 MTS/IEEE Conference, 2008, Quebec City, Canada.
89. Purcell M., Allo D., Sherrell A. et al Use of REMUS 6000 in the Search for the Air France Flight 447 Wreckage // Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, 2011, Kona, USA.
90. Rahimi M., Pon R., Kaiser W.J., Sukhtame G.S., Estrin D., Srivastava A.M. Adaptive Sampling for Environmental Robotics // IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2004. – Vol. 4. – P. 3537–3544.
91. Rahman R.H., Benson C., Frater M. Routing Protocols for Underwater Ad Hoc Networks // Proceedings of the OCEANS MTS/IEEE Conference. – Yeosu, Korea. – 2012.
92. Rajan K., Py F., Barreiro J. Towards Deliberative Control in Marine Robotics // Marine Robot Autonomy. – Springer, 2013. – P. 91–176.
93. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. Gaussian Processes for Machine Learning: the MIT Press, 2006. – 266 p.
94. Richards A., Bellingham J., Tillerson M., How J. Coordination and control of multiple UAVs // AIAA Conference on Guidance, Navigation, and Control, August 5-8, 2002, Monterey, USA.
95. Riemersma G. AUV Master class: survey vessel replaced by AUV? // Hydro international. – 2001, – P. 44–45.
96. Sanz P.J., Ridao P., Oliver G., Casalino G., Petillot Y., Silvestre C., Melchiorri C., Turetta A. TRIDENT An European Project Targeted to Increase the Autonomy Levels for Underwater Intervention Missions // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
97. Schulz B., Hobson B., Kemp M., Meyer J., Moody R., Pinnix H., Clair M.S. Field results of multi-UUV missions using Ranger micro-UUVs // Proceedings of

- the OCEANS 2003 MTS/IEEE Conference, 2003, San Diego, USA. – P. 956–961.
98. Sujit P.B., Sinha A., Ghose D. Multiple UAV Task Allocation using Negotiation // Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems AAMAS-2006, Hakodate, Japan, 2006. – P. 471-478.
99. Tao Ch., Da X., Zheping Ya., Yufei Zh. Mission Control of AUV for Terrain Survey Using Discrete Event System Theory // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
100. The Travelling Salesman Problem and Its Variations / под ред. Gutin G., Punnen A.P.: Springer, 2002. – 830 p.
101. Thompson D., Caress D., Clague D. et al MBARI Dorado AUV's Scientific Results // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
102. Tuphanov I., Scherbatyuk A. Adaptive Algorithm of AUV Meander Pattern Trajectory Planning for Underwater Sampling // Proceedings of the Pacific Asia Offshore Mechanics Symposium (PACOMS). – Vladivostok, Russia, 2012. – P. 181–185.
103. Tuphanov I., Scherbatyuk A. Algorithms for Underwater Local Heterogeneity Survey Based on AUV Group Usage // Proceedings of the OCEANS MTS/IEEE Conference. – Yeosu, Korea. – 2012.
104. Tuphanov I., Scherbatyuk A., Vaulin Yu. Development of Centralized Control System for AUV Group Operation // Proceedings of the 18th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. – 2013, Portsmouth, USA.
105. Ulam P., Eendo Y., Wagner A. et al Integrated Mission Specification and Task Allocation for Robot Teams – Design and Implementation // 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007, Roma, Italy – P. 4428–4435.

106. Webb D.C., Simonetti P.J., Jones C.P. SLOCUM: An underwater glider propelled by environmental energy // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2001. – Vol. 24, Issue 4. – P. 447–452.
107. Woithe H.C., Eichhorn M., Schofield O., Kremer U. Assessing automated and human path planning for the Slocum glider // Proceedings of the 18th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. – 2013, Portsmouth, USA.
108. Woolsey M., Diercks A.-R., Jarnagin R., Asper V. L. Simultaneous Operation of Heterogeneous AUVs // Proceedings of the OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference, 2013, San Diego, USA.
109. Yilmaz N.K., Evangelinos C., Lermusiaux P.F.J., Patrikalakis N.M. Path Planning of Autonomous Underwater Vehicles for Adaptive Sampling Using Mixed Integer Linear Programming // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2008. – Vol. 33, No. 4. – P. 522–537.
110. Yueyue D., Beaujean P., An E., Carlson E. A Path Planning Control Strategy for Search-Classify Task using Multiple Cooperative Underwater Vehicles // Proceedings of the OCEANS 2008 MTS/IEEE Conference, 2008, Quebec City, Canada.
111. Yueyue D., Beaujean P., An E., Carlson E. Task Allocation and Path Planning for Collaborative AUVs Operating Through an Underwater Acoustic Network // Proceedings of the OCEANS 2010 MTS/IEEE Conference, 2010, Seattle, USA.
112. Zhang B., Sukhtame G. Adaptive Sampling for Estimating a Scalar Field using a Robotic Boat and a Sensor Network // 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 10–14, 2007, Roma, Italy. – P. 3673–3680.



## Приложение 1. Акт внедрения результатов диссертационной работы.

  
«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по науке и инновациям ДВФУ  
Цхе А.В.  
«27» декабря 2013 г.

**А К Т**

внедрения результатов диссертационной работы «Методы решения обзорно-поисковых задач с применением групп автономных необитаемых подводных аппаратов» научного сотрудника Лаборатории необитаемых подводных аппаратов и их систем при кафедре Автоматизации и управления Инженерной школы ДВФУ Туфанова Игоря Евгеньевича в научной и практической работе Дальневосточного федерального университета.

Комиссия в составе председателя, заведующего кафедрой Автоматизации и управления, д.т.н., профессора Филаретова В.Ф. и членов: заведующего Лабораторией необитаемых подводных аппаратов и их систем, д.т.н., чл.-корр. РАН Щербатюка А.Ф., научного сотрудника Лаборатории необитаемых подводных аппаратов и их систем, к.т.н. Дубровина Ф.С. составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы научного сотрудника Лаборатории необитаемых подводных аппаратов и их систем Туфанова И.Е. на тему «Методы решения обзорно-поисковых задач с применением групп автономных необитаемых подводных аппаратов» внедрены в научной и практической работе Дальневосточного федерального университета, а именно:

- 1) способ представления заданий на основе математической модели задачи планирования в группе АНПА используется в составе системы программного управления АНПА и АНВА «МАРК»;
- 2) входящие в состав комплекса программ алгоритмы решения задачи оптимального планирования в группе АНПА используются в составе системы управления АНПА и АНВА «МАРК»;
- 3) разработанный комплекс программ используется для моделирования групповой работы АНПА при исследовании методов решения обзорно-поисковых задач.

Председатель комиссии: \_\_\_\_\_ д.т.н., профессор Филаретов В.Ф.

Члены комиссии \_\_\_\_\_ д.т.н., чл.-корр. РАН Щербатюк А.Ф.

\_\_\_\_\_ к.т.н. Дубровин Ф.С.