

ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНПА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ В КАРСКОМ МОРЕ

А.И. Боровик

Рассматривается технология обследования потенциально опасных подводных объектов в Карском море, которая применялась во время выполнения работ автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) «Пилигрим» в рамках экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (85-й рейс) в 2021 году. Предложенная технология затрагивает вопросы планирования миссий аппарата, подготовки программного и алгоритмического обеспечения, управления АНПА, обработки и анализа полученных данных. Описаны особенности организации совместных работ с аппаратами телеуправляемого и буксируемого типа, а также организации погружений и взаимодействия с экипажем судна-носителя. Описаны и проанализированы проблемы, возникшие при выполнении работ, а также предложены методы для их решения. Приведены основные результаты, полученные в процессе выполнения аппаратом поставленных задач.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, потенциально опасные подводные объекты, экологический мониторинг, морская экспедиция, программное обеспечение

Введение

Одной из важнейших проблем современной Арктики является наличие большого количества затопленных подводных потенциально опасных объектов (ППО) в Карском и Баренцевом морях – аварийных атомных подводных лодок, реакторных отсеков, судов с остатками топлива, контейнеров с ядерными отходами (ЯО) и т.п. [1]. Требуется постоянный мониторинг состояния объектов с уже определенным местоположением, а также поиск объектов, точные координаты которых пока неизвестны. К объектам с известным местоположением относятся, в частности, контейнеры с ядерными отходами, целостность внешних оболочек которых необходимо контролировать визуально и с использованием средств измерения радиоактивного загрязнения. К объектам с неустановленными на момент начала экспедиции координатами относится баржа с реактором атомной подводной лодки, затопленная в Новоземельской впадине Карского моря в 1972 году. Координаты ее затопления были известны лишь приблизительно на основе имеющихся архивных данных [2]. Спектр аппаратуры, применяемой для поиска и обследования

подобных объектов, достаточно широк – буксируемые гидролокаторы бокового обзора и видеокамеры, телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), оснащенные, в частности, приборами для подводного измерения радиоактивного загрязнения, а также автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) [2,3].

АНПА позволяют осуществлять как поиск и уточнение координат новых ППО, так и мониторинг состояния объектов с уже известными координатами, работая в автономном режиме. В данной статье рассмотрен опыт применения АНПА «Пилигрим» разработки ИПМТ ДВО РАН при выполнении означенных исследований во время 85-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». В статье описана апробированная технология выполнения поисковых и исследовательских операций АНПА, которая включает в себя планирование как мелководных, так и глубоководных миссий, подготовку программного и алгоритмического обеспечения, управление аппаратом, а также организацию погружений и взаимодействия с экипажем судна-носителя и группами применения других поисковых средств – буксируемых и телеуправляемых.

Статья построена следующим образом. В разделе 1 описаны основные моменты подготовки АНПА к работам в условиях высоких широт. В разделах 2–4 рассмотрены особенности выполнения с помощью АНПА различных типов обследовательских операций. В каждом из разделов описаны и проанализированы основные возникшие проблемы и предложены методы их решения.

1. Подготовка АНПА «Пилигрим» к выполнению работ

АНПА серии МТ-2010 «Пилигрим» (рис. 1) был спроектирован для решения осмотровых и поисковых задач на глубинах до 3000 м. Аппарат штатно оборудован бортовой комплексированной навигационной системой, включающей GPS, датчик глубины, доплеровский лаг, компас, эхолокационную систему и средства гидроакустической навигации и связи с длинной базой (ГАНС ДБ) [4]. Средства ГАНС ДБ позволяют отслеживать перемещения АНПА в реальном времени, а также управлять параметрами движения и выполнения миссии с помощью телекоманд, подаваемых с корабельного поста управления. В состав аппаратных средств ГАНС ДБ входит приемник, установленный на аппарате, комплект донных маяков-ответчиков, которые должны устанавливаться в акватории до начала работ, а также судовая гидроакустическая антенна. В состав программных средств ГАНС ДБ входят драйвер приемной антенны, исполняющийся в системе управления АНПА, а

также планшет навигатора, с помощью которого осуществляется управление судовой гидроакустической антенной для непрерывного контроля работы АНПА и маяков-ответчиков [5].

Исследовательское оборудование, установленное на аппарате, включает в себя гидролокаторы бокового обзора с высокой и низкой частотами работы (ГБО ВЧ, ГБО НЧ), фотокамеру со вспышкой, а также измеритель параметров среды, позволяющий измерить соленость, электропроводность и скорость звука в исследуемой акватории.

Аппарат «Пилигрим» не оборудован инерциальной навигационной системой, поэтому одним из важнейших факторов, влияющих на качество подводной навигации, является калибровка бортового магнитного компаса и учет магнитного склонения в районе работ [6]. Калибровка магнитного компаса заключается в учете влияний, оказываемых бортовым оборудованием и внешними магнитными полями на его работу. Калибровка производится автоматически системой управления АНПА в ходе специальной настроечной миссии, выполняемой один раз до начала работ в конкретной акватории. Арктический регион в целом и Карское море в частности характеризуются большим диапазоном изменения магнитного склонения (рис. 2), который был учтен при составлении миссий аппарата. Для оценки проведенной калибровки и выбранного склонения использовалась миссия, состоящая из двух взаимобратных галсов длиной 500 метров, которую аппарат выполнял на рабочей глубине, без использования навигационных поправок ГАНС



Рис. 1. АНПА «Пилигрим» на палубе НИС «Академик Мстислав Келдыш»

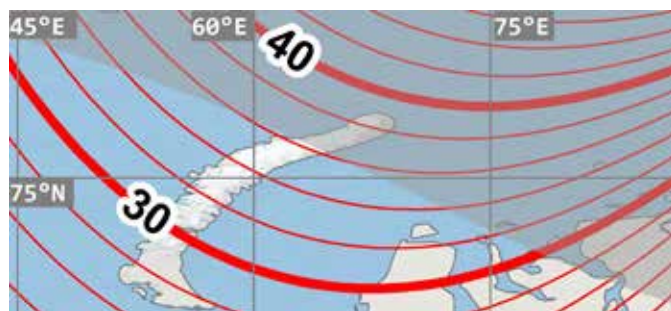


Рис. 2. Карта магнитных склонений в районе проведения работ

ДБ. В конце каждого галса аппарат осуществлял всплытие на поверхность. Оператором анализировалась невязка координат точки всплытия, вычисленных комплексированной навигационной системой (использующей данные от компаса и доплеровского лага) и полученных по GPS. При необходимости вносились поправки в величину склонения. Во время калибровок результирующая ошибка составляла не более 50 м, т.е. не более 10% от пройденного пути.

При подготовке аппарата к экспедиции учитывалось, что часть миссий будет выполняться без установки маяков ГАНС ДБ в районах работ (и, как следствие, без использования соответствующих поправок комплексированной навигационной системы) с целью экономии судового времени и для минимизации рисков потери маяков из-за плохих погодных условий. В основном такие миссии планировались в мелководных районах в заливах. Была доработана специальная команда миссии, осуществляющая всплытие аппарата в конкретной точке, получение координат GPS и сброс накопленной ошибки счисления с последующим переходом на прежнюю рабочую глубину. Все миссии аппарата, выполнявшиеся без использования маяков ГАНС ДБ, были разделены на небольшие подзадания, между которыми выполнялось всплытие с уточнением координат.

Особенностью экспедиции являлось большое количество запланированных работ в мелководных и глубоководных акваториях. Из-за принципиально разной солености воды в каждом районе часто возникала необходимость в оперативном изменении балластировки аппарата. Была разработана специальная методика быстрой перебалластировки АНПА, которая заключалась в использовании двух легкодоступных секций для размещения балласта, а также применении программного комплекса, состоящего из программы-миссии, модуля для программы просмотра IMTPLooker, позволяющего выгружать нужные для балластировки данные в отдельном формате, и программы для расчета весов и размещения балластировочных грузов.

К другим доработкам программного обеспечения АНПА можно отнести модификацию алгоритма обхода препятствий с целью повышения надежности фотографирования объектов с малого расстояния [7, 8]. Программа просмотра собираемых данных IMTPLooker была доработана для автоматического вычисления размера фотокадра и нанесения на него размерной линейки на основе данных о высоте аппарата над грунтом в момент получения кадра и данных об углах кадра по горизонтали и вертикали для используемого в аппарате объектива [9].

2. Особенности выполнения работ по обследованию контейнеров с ЯО

Работы по обследованию свалок контейнеров с ядерными отходами выполнялись в мелководных бухтах. Целью работ являлось получение фотографий для визуальной оценки состояния внешних оболочек контейнеров. Установка в акватории маяков ГАНС ДБ выполнялась лишь в трети всех случаев применения. Основной алгоритм обследования включал в себя следующие шаги:

1. Определение на основе доступной информации квадрата акватории со свалкой.

2. Выполнение миссии АНПА, задающей фигуру движения типа «Меандр» (рис. 3, слева) – покрытие заданного квадрата сетью взаимобратных галсов с межгалсовым расстоянием 60 м для получения ГБО ВЧ-изображений дна [10]. Подобные миссии выполнялись на отстоянии от грунта 8–10 м со скоростью движения 0.8–1 м/с.

3. Анализ полученных ГБО-изображений, поиск на них контейнеров с ЯО.

4. Выполнение миссии АНПА по детальному обследованию найденных контейнеров с помощью фотосистемы. Найденные группы объектов были вписаны в квадраты размером не более 100×100 м каждый, обследование квадрата выполнялось с использованием фигуры движения типа «Спираль» (рис. 3, справа) [10]. При выполнении обследования АНПА двигался в позиционном режиме со скоростью, плавно меняющейся от 0.3 до 0.5 м/с, на высоте 1.5–2 м над грунтом. Переход между обследуемыми квадратами выполнялся по поверхности для уточнения координат по GPS и сбросу накопленной навигационной ошибки. В случае, когда в районе работ были установлены маяки ГАНС ДБ, переход между рабочими квадратами осуществлялся на безопасной высоте, без выхода на поверхность, с целью экономии ресурса батареи АНПА.

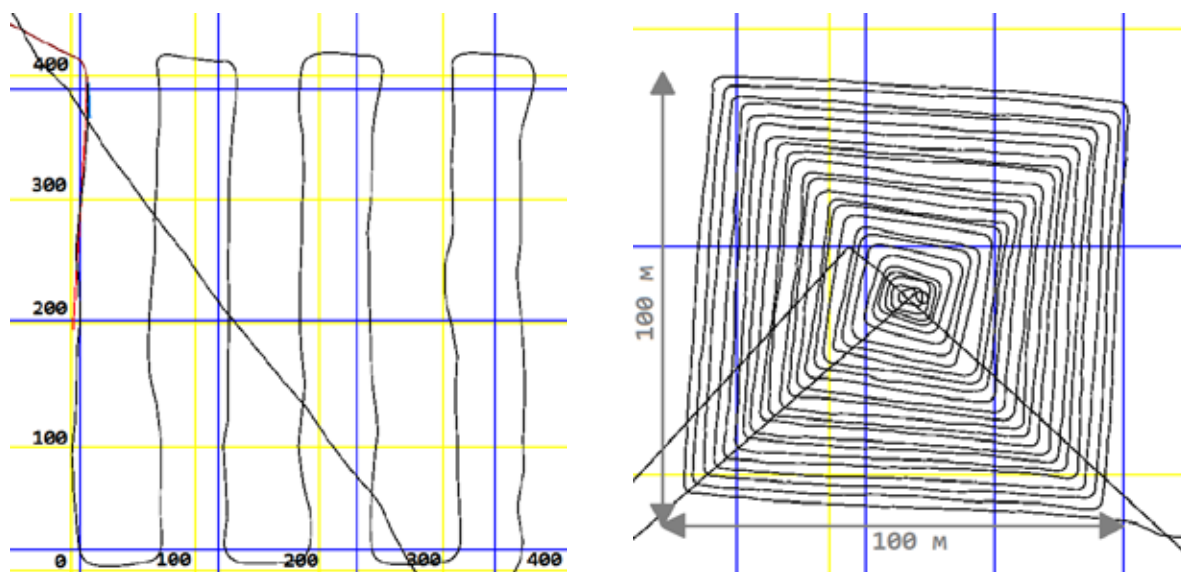


Рис. 3. Траектории движения АНПА при обследовании контейнеров с ЯО. Слева – траектория начального ГБО-обследования, справа – спиральная траектория обследования каждого квадрата

5. Анализ фотоизображений, выявление на них контейнеров с поврежденными оболочками и передача этой информации другим отрядам для детального обследования таких контейнеров с помощью ТНПА с установленными гамма-спектрометрами подводного исполнения.

По завершении каждой миссии АНПА поднимался на борт судна, где выполнялось его обследование с помощью средств оценки уровня радиационного загрязнения. Во всех случаях радиоактивный фон аппарата не превышал фоновый. Пример собираемых аппаратом данных приведен на рис. 4.

Аппарат выполнял фотографирование 1 раз в 3 секунды (из-за ограничений, накладываемых им-

пульсной фотовспышкой), а общее рабочее время в каждой миссии нередко превышало 6 часов, в результате чего при постобработке приходилось иметь дело с большим объемом информации. Для быстрого нахождения фотографий с объектами использовался следующий способ – на один экран программы IMTRLooker выводились фотографии и графики глубины и высоты (см. рис. 5). Места видимых резких изменений на графиках соответствовали изменению глубины моря в точке, что свидетельствовало о наличии на фотографиях с той же временной меткой объектов поиска.

Можно выделить три основные проблемы, возникшие при выполнении этих работ.

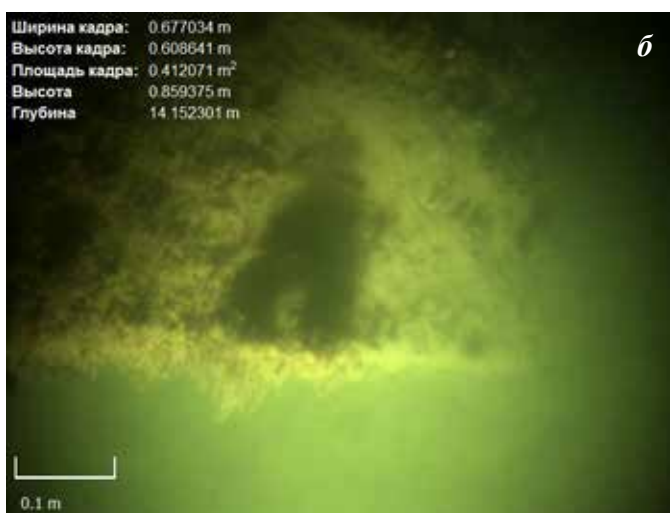
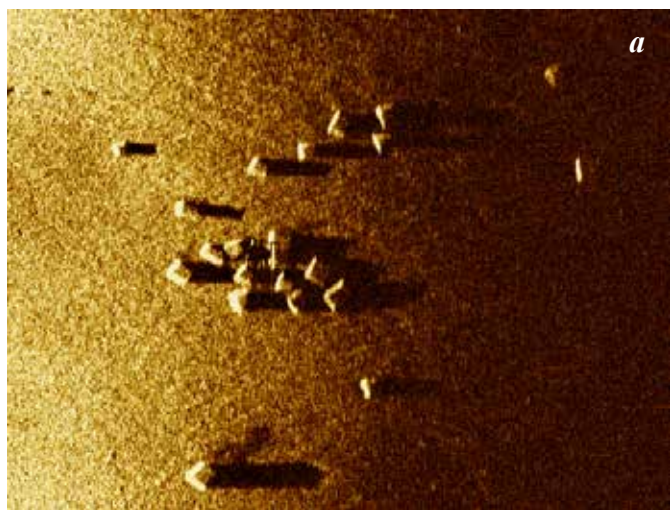


Рис. 4. Пример данных миссии по обследованию контейнеров с ЯО: а – изображен фрагмент ГБО-изображения свалки, б – фотокадр с контейнером

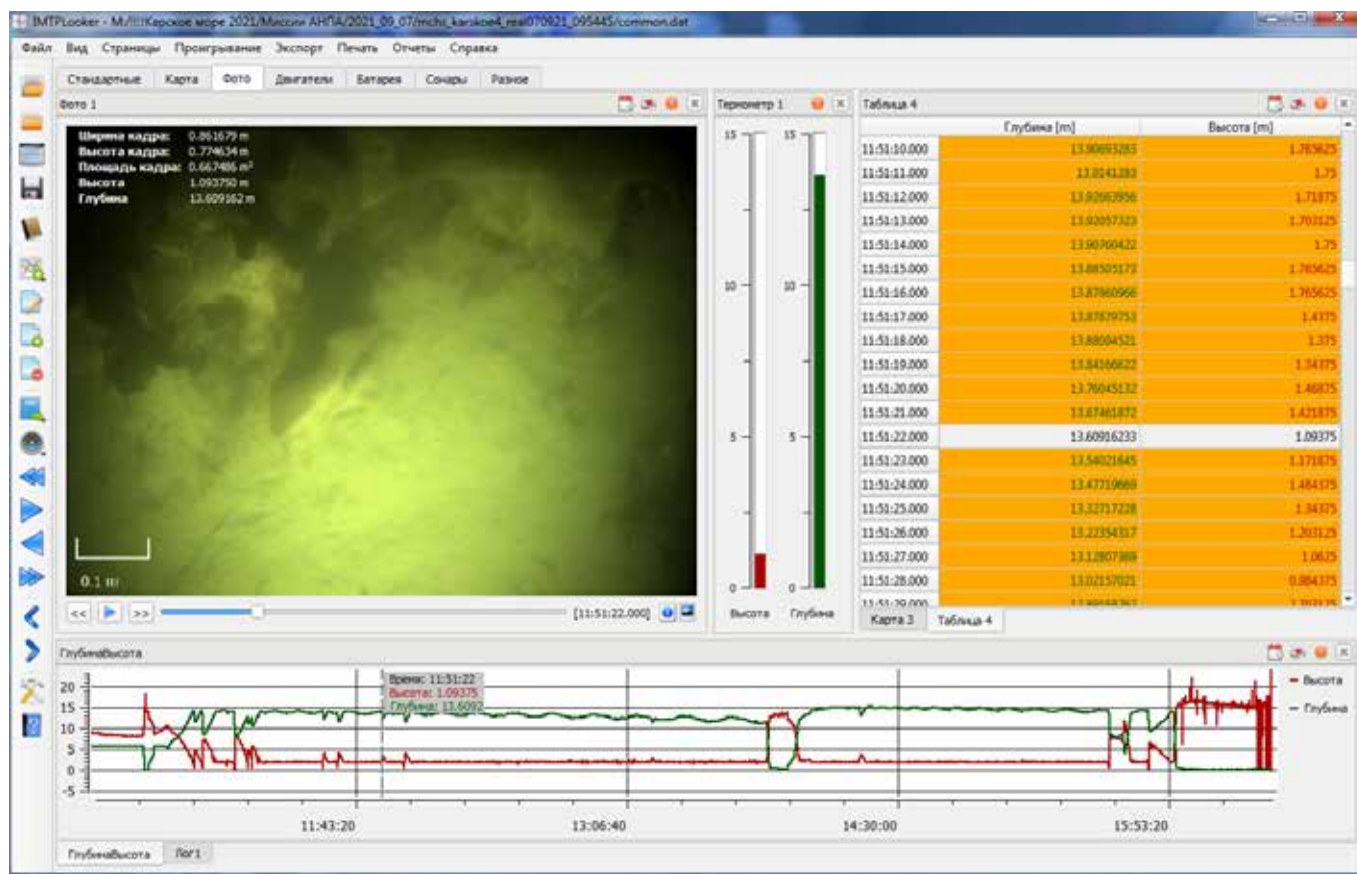


Рис. 5. Внешний вид программы IMTPLooker при работе с данными миссии по обследованию свалок контейнеров с ЯО

1. Низкое качество фотографий, частично объяснимое высокой мутностью воды в бухтах, частично – невысоким качеством используемой фотоаппаратуры. В дальнейших экспедициях предлагается заменить камеру на более современную.

2. Излишняя «реактивность» алгоритма обхода препятствий, выражающаяся в быстром и большом изменении рабочей высоты аппарата при обходе детектированного препятствия по курсу. Данное поведение приводит, при условии и без того невысокого качества фото, к появлению «смазанности» и иных дефектов на получаемых изображениях (к которым, в том числе, приводит работа подруливающих двигателей, поднимающих ил со дна). До участия аппарата в последующих экспедициях планируется модификация алгоритма и регуляторов движения для обеспечения более плавной реакции на препятствие с минимальным изменением дифферента аппарата при обходе объекта сверху.

3. Необходимость планирования миссий с учетом постоянных всплытий для уточнения позиции, в случае отказа от установки маяков в рабочей акватории. В таких случаях более приемлемым вариантом является применение гидроакустической навигационной

системы с ультракороткой базой (ГАНС УКБ), которая позволила бы координировать аппарат с использованием только одной антенны, установленной на судне. Оборудование АНПА «Пилигрим» подобной системой является одной из рекомендаций для будущих модификаций аппарата.

3. Особенности выполнения поисково-обследовательских работ

Поисковые работы выполнялись в районах с глубинами 300–400 м. Целью работ являлся поиск утонувших и затопленных судов с опасным грузом, в том числе баржи с реактором атомной подводной лодки. Планируемый алгоритм работы состоял из следующих пунктов.

1. Установка трех маяков-ответчиков системы ГАНС БД в акватории на расстоянии 1–2 км друг от друга.

2. Выполнение трех миссий АНПА, покрывающих сетью взаимобратных галсов с межгалсовым расстоянием 400 м три прямоугольных области размером 3×5 км – одна выше треугольника, образуемого установленными маяками, вторая – непосредственно

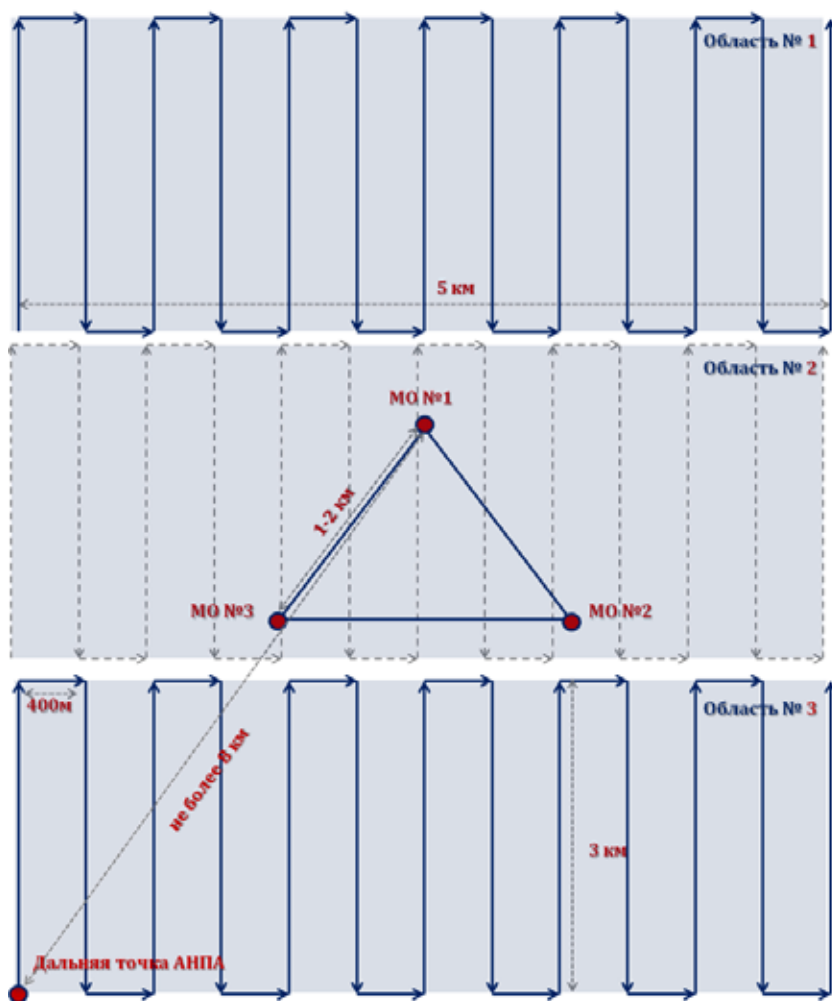


Рис. 6. Алгоритм расстановки маяков и выбора обследуемых районов в поисковой миссии

ственно поверх этого треугольника и третья – снизу треугольника (см. рис. 6). Во время выполнения каждой миссии аппарат, с помощью ГБО НЧ, получает акустическое изображение дна, при этом в каждой точке траектории оставаясь на расстоянии не более 8 км до самого дальнего акустического маяка-ответчика системы ГАНС БД (что обеспечивает периодический сброс накопленной навигационной системой ошибки без необходимости всплытия аппарата на поверхность). Размер исследуемой области в каждой миссии подобран исходя из возможности работы аппарата на одном заряде батарей не более 14 часов.

3. Анализ полученных ГБО-изображений на предмет наличия на них объектов, требующих дополнительного обследования.

4. Обследование, при необходимости, найденного на ГБО-изображении объекта с помощью ГБО ВЧ и фото.

5. Переход в новую рабочую область, переустановка маяков и повторение работ п. 1–4.

Проблемой, возникающей при выполнении работ указанным образом, является необходимость нахождения судна в районе акустической слышимости АНПА для контроля выполнения миссии аппаратом со стороны оператора. При наличии на судне дополнительного поискового средства (буксируемого ГБО НЧ) оптимальным решением было бы выполнение работ судном в смежном районе, на расстоянии, обеспечивающем стабильную акустическую связь с аппаратом. В то же время одновременная буксировка двух разных приборов с длинными тросами (ГБО НЧ и судовой гидроакустической антенны для связи с аппаратом) может привести к их запутыванию и, как следствие, потере дорогостоящего оборудования. Оптимальным решением видится создание нового или дооборудование существующего буксируемого модуля средствами для установки гидроакустической антенны ГАНС ДБ и буксируемого ГБО НЧ. В этом случае будет возможно выполнение работ судном по съемке ГБО-изображений дна параллельно с поддержанием постоянной гидроакустической связи с АНПА, выполняющим ту же задачу. Внедрение такого решения позволит значительно увеличить объем работ, выполняемых в течение судовых суток.

4. Обследование затонувшей баржи

В ходе выполнения поисковых работ буксируемым судовым ГБО НЧ была обнаружена затопленная баржа, для детального обследования которой было решено использовать АНПА. Для аппарата было составлено две миссии.

1. Обследование с помощью ГБО ВЧ квадрата размером 500×500 м, в центре которого находился найденный судовым ГБО НЧ объект. При выполнении миссии аппарат двигался на высоте 10 м со скоростью 1 м/с, межгалсовое расстояние – 60 м. Данная миссия выполняла сразу несколько задач: получение детального ГБО-изображения баржи, которое было необходимо для планирования безопасной траектории ее обследования с помощью фотосистемы, а также уточнение координат баржи в навигационной базе, задаваемой ГАНС ДБ. На основе анализа

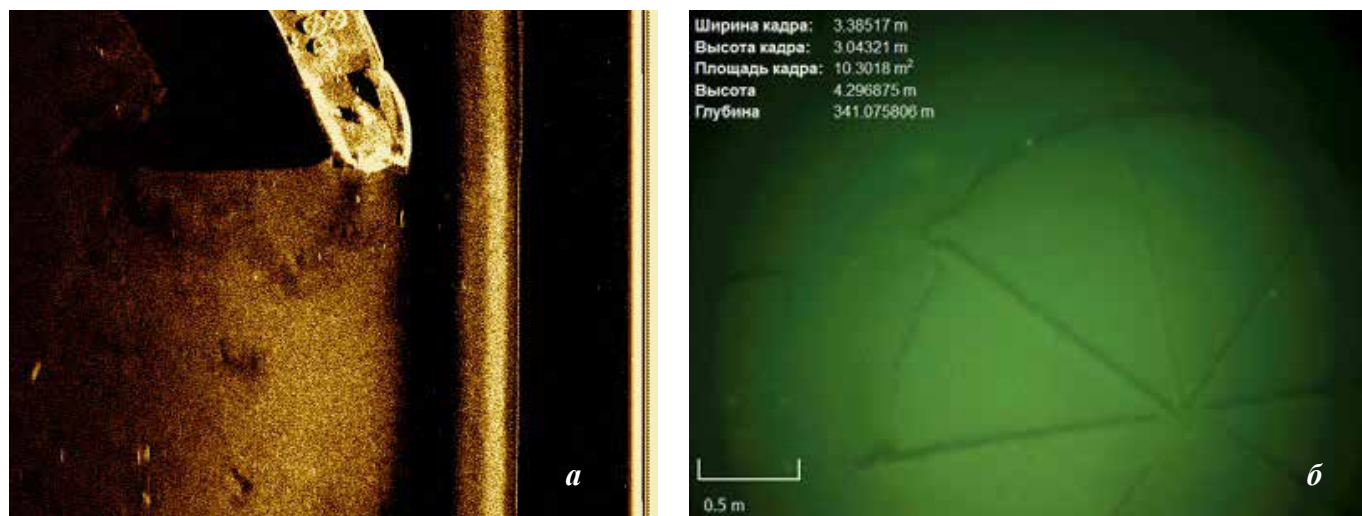


Рис. 7. Пример изображений затопленной баржи, полученных АНПА «Пилигрим»: а – фрагмент ГБО-изображения, б – фотокадр палубы

ГБО-изображений было установлено, что корпус баржи частично зарыт в грунт, при этом левый борт существенно ниже правого – он выступает над дном на 1.5 м, тогда как правый – на 3 м.

2. Обследование баржи с помощью фотосистемы, выполненное в позиционном режиме, со скоростью 0.5 м/с на высоте 3 м. Для того чтобы минимизировать риски столкновения АНПА с надстройками и прочими элементами корпуса баржи, а также попадания аппарата в ее подзор или внутренние помещения через отверстия в корпусе, миссия была составлена следующим образом:

- обследование выполнялось с использованием фигуры движения типа «Меандр», чтобы исключить повороты АНПА над корпусом баржи;
- аппарат двигался перпендикулярно корпусу баржи, заходя с левого, более утопленного в грунт борта, чтобы минимизировать риски пропуска препятствий эхолокационной системой.

Обследование было выполнено успешно, результаты переданы для анализа специалистам. Пример полученных ГБО и фотоизображений приведен на рис. 7.

Заключение

В ходе экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш» (85-й рейс) АНПА «Пилигрим» обследовал с помощью ГБО ВЧ более 650000 м² акватории, получил более 30000 снимков, общее чистое время работы составило около 50 часов. Полученные аппаратом данные были использованы для визуального анализа состояния подводных потенциально опасных объектов: контейнеров с ядерными отходами и затопленной баржи с потенциально опасным грузом. В ходе выполнения задач экспедиции были выявлены некоторые проблемы, возможные способы решения которых предложены в данной статье. Опыт применения аппарата в данной экспедиции показывает перспективность использования подобной техники для решения экологических поисковых и обследовательских задач.

Автор выражает благодарность отряду ЦСООР «Лидер» МЧС России и экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» за высокопрофессиональное обеспечение применения АНПА, руководству экспедиции и коллегам из ИО РАН за сотрудничество и помощь в решении экспедиционных задач, а также всем сотрудникам ИПМТ ДВО РАН, принимавшим участие в разработке, модернизации, подготовке и предварительных испытаниях АНПА «Пилигрим».

ЛИТЕРАТУРА

1. Экологический мониторинг окраинных морей России / А.И. Вяльцев, В.М. Добров, А.А. Долгов [и др.]; ФГБНУ «Аналитический центр», Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: ФГБНУ «Аналитический центр», 2019. 240 с. ISBN 978-5-904670-55-9.
2. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей / А.А. Саркисов [и др.]; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М.: ИБРАЭ РАН, 2015. 699 с.

3. Казеннов А.Ю. Экспедиционные исследования экологии морей Российской Арктики / А.Ю. Казеннов, Б.А. Нерсесов, Н.А. Римский-Корсаков; Аналитический центр Минобрнауки России, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: Аналитический центр Минобрнауки России, 2018. 307 с. ISBN 978-5-904670-47-4.
4. Малогабаритный многофункциональный автономный необитаемый подводный аппарат МТ-2010 / А.А. Борейко, В.Е. Горнак, С.В. Мальцева [и др.] // Технические проблемы освоения Мирового океана. 2011. Т. 4. С. 42–49.
5. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общей ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.
6. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / отв.ред. Л.В. Киселев. Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с. ISBN 9785731104867
7. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Алгоритмы обхода локальных донных объектов для автономного подводного робота // Материалы шестой Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана» (ТПОМО-6). Владивосток, 2015. С. 450–454.
8. Инзарцев А.В., Багницкий А.В. Планирование и реализация траекторий движения автономного подводного робота при выполнении мониторинга в акваториях различных типов // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2(22). С. 25–35.
9. Alexander Yu. Konoplin, Alexey I. Borovik, Denis N. Mikhailov, Yuriy V. Vaulin, Alexander F. Scherbatyuk, Alexey A. Boreiko et al. Application of Autonomous Underwater Vehicles for Research of Ecosystems in the Southern Ocean // Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (eds) Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. *Advances in Polar Ecology*. 2021. Vol 6. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_28
10. Багницкий А.В., Инзарцев А.В. Автоматизация подготовки миссии для автономного необитаемого подводного аппарата в задачах обследования акваторий // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 2(10). С. 17–24.

Об авторе

БОРОВИК Алексей Игоревич, к.т.н., с.н.с.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской Академии наук (ИПМТ ДВО РАН)

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5А.

Область научных интересов: информационно-управляющие системы, подводная робототехника.

E-mail: alexeyborovick@ya.ru

ORCID: 0000-0002-9696-2751

Для цитирования:

Боровик А.И. ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНПА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ В КАРСКОМ МОРЕ // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 1 (39). С. 32–40. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_39_01_03.

