

# О ПРОЕКТЕ СОЗДАНИЯ ПОДВОДНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ГЛУБИН ОКЕАНА

Ю.В. Матвиенко, Л.В. Киселев,  
А.В. Инзарцев, О.Ю. Львов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup>

Проект создания подводного робототехнического комплекса для работы на больших и предельных глубинах океана предполагает выработку общих требований, отвечающих назначению аппарата и его способности решать сложные задачи в экстремальных условиях среды. В основу проекта положен многолетний опыт ИПМТ ДВО РАН по созданию и практическому применению глубоководных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и их систем различного назначения. В научном и прикладном аспектах наибольший интерес вызывают исследования геологического строения дна, гидрологии, геофизических и геохимических процессов, биологического разнообразия и ряда других физических свойств глубоководных районов океана. Робототехнический комплекс, способный решать целиком или частично этот комплекс задач, становится объектом принципиально новой разработки. В проекте рассматриваются проблемы, связанные с оптимальным выбором состава систем и характеристик комплекса, включающего автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), судовые средства навигации и связи, промерный донный маяк-ответчик, стационарную донную навигационную станцию. Основными объектами исследования и разработки являются особенности конструкции АНПА, навигационного обеспечения, информационного взаимодействия, планирования и осуществления рабочих миссий в условиях больших и предельных глубин океана.

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование Мирового океана является одной из наиболее приоритетных и наукоемких областей человеческой деятельности. Анализ современных тенденций развития подводных технологий свидетельствует о том, что ведущие страны мира прилагают значительные усилия к созданию технических средств для освоения мало исследованных районов Мирового океана. Особое значение имеют задачи по исследованию абиссалий и глубоководных районов, сформировавшихся в результате глобальных геологических процессов. Поэтому изучение особенностей их рельефа, структуры донного грунта, физических полей представляет большой научный интерес. Следует отметить, что все проведенные ранее исследования

абиссалий глубоководными техническими средствами характеризуются «точечными», разрозненными измерениями лишь отдельных океанографических параметров. В настоящее время в мире нет технических средств, позволяющих проводить непрерывные, долговременные и протяженные исследования океанского дна на глубинах более 6000 м. Представляется очевидным, что в решении подобных задач наиболее эффективно использование подводных роботов, разработанных с учетом особых условий работы в экстремальной среде [1, 2]. Использование автономных роботов дает возможность измерений многих параметров на большой площади с точной координатной привязкой, выполненной в одном временном масштабе.

Очень важными остаются оценки глубин. Шельф и матери-

ковые отмели характеризуются плавным понижением суши до глубины 200 м. Далее, до 3000 м, довольно круто (4–14°) простирается материковый склон, который завершается подножием (до изобат 3000–4000 м), граничащим с ложем океана (глубина от 4000 до 6000 м). Океанскими хребтами, отдельными возвышениями дна и цепочками гор ложе разделяется на отдельные котловины [3, 4]. Наиболее глубокие части океана заняты глубоководными желобами, максимальные глубины которых представлены ниже в виде табл. 1, а их географическое положение показано на рис. 1.

В выполненных несистематизированных исследованиях глубоководных районов наибольший объем данных получен по району

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а.  
Тел/факс: (423) 243-24-16. E-mail: inzar@marine.febbras.ru

Таблица 1. Глубоководные желоба и их максимальные глубины, м

Марианский Тонга Курило- Камчатский	Филиппинский Кермадек Идзу-Бонинский	Японский Пуэрториканский Перуанско- Чилийский	Алеутский Зондский (Яванский) Кайман
10989	10047	8412	7820
10800	10540	8385	7450
10542	9810	8055	7093

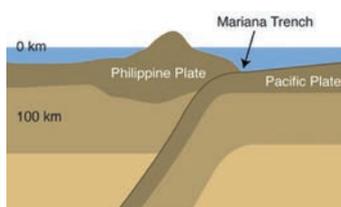
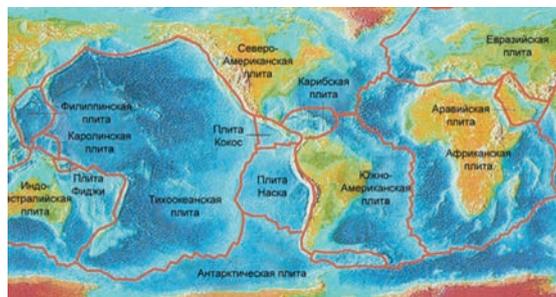


Рис. 1. География расположения глубоководных впадин

Марианского желоба, где расположена, по предварительным оценкам, глубочайшая точка Мирового океана, однако даже ее максимальная глубина, около 11000 м, до сих пор точно не установлена. Марианская впадина – глубоководный желоб в западной части Тихого океана, к востоку и югу от Марианских островов. Протяженность Марианской впадины 1340 км, средняя ширина 59 км. Максимальная глубина 11022 м расположена в южной части, измерена советским исследовательским судном «Витязь» в 1957 г.

Все проведенные ранее исследования Марианского желоба глубоководными средствами были, можно сказать, «точечными». Хорошо известно первое погружение на рекордную глубину 10750 м, выполненное в 1960 году Ж. Пикаром и Д. Уолшем на батискафе «Триест». Погружение имело большой резонанс, но какой-либо научной ценности оно не представляло. После этого только в 1995 году японский подводный аппарат с дистанционным управлением «Kaiko» впервые опустился на дно Марианского желоба в месте, имеющем глубину 10911 м. В дальнейшем аппарат «Kaiko» использовался

главным образом для биологических исследований в Марианской впадине. В ходе этих исследований в 2002 году было обнаружено множество видов неведомых науке одноклеточных организмов, существующих в неизменном виде почти миллиард лет. В 2009 году в Марианскую впадину погружался гибридный (автономно-привязной) аппарат «Nereus», созданный в США усилиями нескольких организаций. Были проведены локальные измерения гидрофизических и гидрохимических параметров, взяты пробы грунта.

#### ■ Основания и предпосылки создания АНПА для больших и предельных глубин

Идеи и проекты создания многофункциональных АНПА для исследования больших и предельных глубин океана неоднократно возникали в течение предшествующих лет. Эти идеи и проекты были основаны на опыте создания и практического применения преемственного ряда обзорно-поисковых и обследовательских аппаратов с глубиной погружения до 6000 метров [5–8]. Наиболее значительные успехи были достигнуты

при создании робототехнического комплекса «Клавесин-1Р» и его опытной эксплуатации в различных районах Мирового океана.

В настоящее время серийные образцы АНПА «Клавесин-1Р» эксплуатируются соединениями российского военно-морского флота (рис. 2).

В последнее десятилетие предпринималось несколько попыток разработки проекта АНПА для проведения исследований в Марианском глубоководном желобе. Инициаторами проектов выступали Российская академия наук, Русское географическое общество, и специалистами ИПМТ ДВО РАН были выполнены оценки по всем принципиальным вопросам проектирования АНПА. В 2015 году проект под названием «Витязь» был рассмотрен Фондом перспек-



Рис. 2. Серийные образцы АНПА «Клавесин-1Р»

тивных исследований РФ и получил положительную оценку в отношении методологии и возможности реализации проекта на основе технологии, разработанной в ИПМТ ДВО РАН. В настоящей статье представлены основные идеи, научные и технологические проблемы, связанные с осуществлением проекта.

#### ■ Особенности задач, решаемых с помощью АНПА в глубоководных исследованиях

Области применения АНПА для решения океанографических и поисково-обследовательских задач определяются не только

функциональным назначением того или иного проекта, но и условиями среды, в том числе глубиной морской акватории и характером рельефа дна. В этом отношении абиссальные районы имеют немало особенностей, накладывающих дополнительные требования ко всем элементам робототехнического комплекса.

В качестве одной из важнейших задач следует рассматривать создание точных *батиметрических карт* глубоководных районов. При этом могут быть использованы уже имеющиеся батиметрические данные и модели рельефа, построенные на основе этих данных. Так, американскими специалистами в 2013 году была построена математическая модель площадки Челленджера в Марианской впадине. С помощью АНПА можно получить прямые экспериментальные данные батиметрии, которые позволят значительно уточнить эту модель и получить ответы на важные вопросы по географии Земли.

Серьезное значение имеет *исследование геологического строения дна* глубоководных впадин, особенностей микрорельефа, геофизических полей, минерального сырья, биологического разнообразия. Данный класс исследований предполагает использование АНПА на расстояниях от дна от единиц до десятков метров. По имеющимся данным, например [3, 4], рельеф дна в большинстве глубоководных районов сформировался в результате вулканической деятельности и разломов в земной коре. Основу рельефа во многих местах составляют подводные горы (гайоты). Микрорельеф гайотов изучен слабо, и о нем можно судить лишь по фотографиям и словесным описаниям гидронавтов [5].

В нижних поясах гайотов наблюдаются осадки, обломки вул-

канических образований, поверхность верхних поясов определяется в основном вулканическими образованиями. Кроме чисто геологических задач с помощью АНПА можно производить оценку запасов минерального сырья, образовавшегося в результате вулканической деятельности или длительных физико-химических процессов. Речь может идти об оценке запасов железомарганцевых конкреций, лежащих преимущественно на равнинных участках океанского дна, и железомарганцевых корок, образующихся на свободных от осадков наклонных участках гайотов.

АНПА традиционно используются как для оперативного, так и долговременного мониторинга водной среды. В этом отношении исследование глубоководных впадин имеет лишь ту особенность, что ввиду малой изученности больших глубин спектр измерений должен включать геофизические, гидрологические и гидрохимические параметры, параметры для оценки биологических свойств и экологического состояния среды.

### ■ Основные научно-технические и технологические проблемы при создании глубоководного робототехнического комплекса

#### *Конструктивно-технологические особенности проекта*

При погружениях на большую глубину конструкция аппарата находится под воздействием переменного гидростатического давления, которое на предельных глубинах составляет более одной тысячи атмосфер. В связи с этим требуют своего решения две проблемы:

– обеспечение прочности конструкции аппарата при высоком внешнем давлении,

– компенсация избыточной плавучести, обусловленной увеличением плотности воды по мере увеличения глубины погружения.

В традиционной схеме корпусной модульной конструкции системы аппарата размещены в отдельных небольших герметичных контейнерах и компенсация отрицательной плавучести достигается применением сферопластиковых блоков плавучести, придающих жесткость всей конструкции. Этими факторами и требованиями, предъявляемыми к энергетике (автономности), обусловлены масса и размеры аппарата. Оценки, проведенные при подготовке проекта, приводят к выводу о необходимости применения конструктивных материалов, обеспечивающих определенный компромисс требований по прочности и плавучести корпусной конструкции. В табл. 2 приведены расчетные характеристики прочных корпусов подводного аппарата для предельных глубин Мирового океана [10, 11].

Прочный корпус состоит из цилиндрической оболочки и двух полусферических крышек. Рассмотрены возможности создания прочного корпуса для следующих конструктивных материалов: алюминиевого сплава В95, титанового сплава ВТ22 и композитного материала, состоящего из цилиндрической оболочки, стеклометаллокомпозита и полусферических крышек из алюминиевого сплава В95.

При расчете объема (массы) аппарата будем исходить из условия, что в конструкции используется легковесный наполнитель типа синтактика с эффективной плотностью 0,8 г/см<sup>3</sup>. Нетрудно далее показать, что при объеме аппаратуры, которая должна быть размещена в прочных корпусах, равном, например 100 л, что соответствует АНПА среднего класса типа МТ-2010 (водоизмещение которого

Таблица 2. Сравнительные характеристики прочных корпусов из различных материалов

Материал	Цилиндрическая оболочка	Полусферическая крышка	Прочный корпус
	Толщина, длина, внешний радиус	Толщина стенки, внешний радиус	Объем, масса, эффективная плотность, г/см <sup>3</sup>
1. Алюминиевый сплав В95	0,6903; 4; 1,6903	0,25; 1,25	46,28; 84,14; 1,818
2. Титановый сплав ВТ22	0,1715; 4; 1,1715	0,0788; 1,0788	22,69; 26,68; 1,176
3. Композит	0,1934; 4; 1,1934	0,1696; 1,1696	24,60; 20,75; 0,843

*Примечание.* Все линейные размеры нормированы на внутренний радиус оболочки, длина оболочки выбрана из условия максимальной устойчивости и равна двум внутренним диаметрам.

составляет 300 кг для предельной глубины 3000 м), ориентировочные расчеты водоизмещения АНПА, выполненных из корпусов 1–3, составят соответственно 4300 кг, 2150 кг и 1900 кг. Результаты расчета для трех вариантов материала представлены в табл. 3.

Необходимо отметить, что стеклометаллокомпозит – новый материал, состоящий из стеклянного слоя, облицованного металлическими обшивками. В качестве облицовок могут быть использованы легкие металлы, обладающие высокими деформационными свойствами. В настоящее время производится отработка технологии изготовления цилиндрических оболочек из стеклометаллокомпозита, состоящего из силикатного стекла и алюминиевых сплавов.

Другая важная проблема связана с обеспечением нейтральной плавучести аппарата при изменении глубины погружения вплоть до предельных глубин океана.

Вследствие увеличения плотности воды с глубиной, которая составляет до 1076 кг/м<sup>3</sup> на максимальных глубинах при среднем значении плотности морской воды на поверхности 1020 кг/м<sup>3</sup>, плавучесть АНПА также изменяется в широких пределах. Кроме того, точное значение плотности на рабочей глубине заранее неизвестно. Опыт глубоководных зависаний АНПА «Клавесин-1Р» выявил увеличение его плавучести на 40,5 Н на каждые 1000 м глубины. Используя принцип подобия, получим увеличение плавучести на глубине 12000 м до 486 Н. Компенсацию этих изменений можно обеспечить с помощью системы регулирования объема (только на его уменьшение при работе на максимальных глубинах).

Анализ путей решения перечисленных выше задач приводит к выводу о необходимости применения нетрадиционного подхода к выбору состава робототехнического комплекса, включающего

Таблица 3. Расчетные данные массы и объема АНПА

Материал	Объем (м <sup>3</sup> ), масса (кг) прочных контейнеров	Масса полезной нагрузки, кг	Объем синтактика, м <sup>3</sup>	Объем аппарата, м <sup>3</sup>
Алюминиевый сплав В95	0,3; 550	800	4	4,3
Титановый сплав ВТ22	0,14; 150	400	2	2,15
Композит	0,14; 100	350	1,75	1,9

автономные, судовые и дистанционно управляемые средства. Проектом предусматривается следующий состав комплекса:

- АНПА;
  - судовой пост управления,
  - стационарная судовая навигационно-связная гидроакустическая антенна (ССГА); предназначена для информационного обмена со стационарной донной станцией с дальностью действия до 20 км;
  - судовая буксируемая гидроакустическая антенна (СБГА) с кабель-тросом длиной до 5 км; предназначена для навигационно-информационного обмена с АНПА с дальностью действия до 10–15 км;
  - промерный донный маяк-ответчик (ПДМО); предназначен для измерения гидрологии, глубины и условий распространения сигналов, обеспечения навигационного обмена с АНПА при его работе вблизи дна с дальностью действия до 10 км;
  - стационарная донная навигационная станция (СДНС); предназначена для обеспечения навигационно-информационного обмена с АНПА при его работе вблизи дна с дальностью действия до 10 км и информационного обмена с ССГА с дальностью действия до 20 км.
- Научное оборудование, устанавливаемое на борту АНПА, обеспечивает выполнение следующего класса работ:
- прецизионная батиметрическая съемка района на площади до 10 км<sup>2</sup>;
  - гидролокационная съемка дна на площади до 30 км<sup>2</sup>;
  - измерения гидрофизических и гидрохимических параметров морской среды по маршруту следования с линейным пробегом до 50 км;
  - фототелевизионная съемка дна на площади до 180 тыс. м<sup>2</sup>;

- гидроакустическое профилирование верхнего слоя грунта на площади до 1,8 км<sup>2</sup>.

К дополнительным функциональным возможностям АНПА в данном проекте можно также отнести:

- выполнение интеллектуальных поведенческих действий с использованием элементов адаптивного управления с автономной и дистанционной коррекцией траекторий, выбором маршрута в сложной среде на основе вероятностных прогнозов о подводной ситуации и состоянии систем АНПА;

- повышение эффективности батиметрических измерений и анализа тонкой структуры морского дна с помощью промерного эхолота;

- установку на дне отделяемого оборудования.

Представим модель взаимодействия элементов комплекса схематично в виде, изображенном на рис. 3. Предварительно в районе работ устанавливается донная станция и выполняется ее координирование с использованием судовых средств навигации и связи. Далее с помощью аппаратуры, раз-

мещенной на буксируемом модуле или буксируемом подводном аппарате, организуется связь с донной станцией. Положение буксируемого аппарата относительно судна должно вычисляться с высокой точностью с использованием дополнительных гидроакустических средств. Донная станция при работе с АНПА выполняет функции опорного маяка гидроакустической навигационной системы, необходимого для дальномерных или дальномерно-угловых измерений на борту АНПА. Кроме того, донная станция должна передавать в направлении от подводного аппарата на обеспечивающее судно информацию о состоянии бортовых устройств и избранные кадры гидроакустической и фототелевизионной съемки. В обратном направлении через донную станцию на подводный аппарат будут поступать команды телеуправления.

Необходимо отметить ряд достоинств представленного комплекса.

Во-первых, благодаря распределению между элементами комплекса функций навигации и информационного обмена значительно уменьшаются энергоза-

траты и объем бортового оборудования АНПА, обеспечивающего работу комплекса.

Во-вторых, повышается точность навигационного обеспечения в целом, поскольку скорость распространения акустических сигналов в горизонтальной плоскости в однородной среде происходит с минимальным градиентом и, кроме того, при использовании высокочастотных сигналов может быть соответственно уменьшен период посылок ГАНС.

В-третьих, в распределенной системе достигается оптимальное соотношение между параметрами навигационных и информационных (связных) сигналов в различных режимах функционирования комплекса.

### *Навигационное обеспечение и связь*

Традиционно в состав навигационного оснащения АНПА входят элементы бортовой автономной, гидроакустической и спутниковой систем навигации. Каждая из систем, в свою очередь, представляет собой комплекс устройств, входящих в общий базовый состав систем АНПА и судового оборудования. Обычно перечень основных задач навигационного комплекса включает:

- высокоточное определение текущих координат АНПА на его борту и на обеспечивающем судне в условиях глубокого моря вплоть до предельных глубин океана;

- координатную привязку с необходимой точностью всех элементов глубоководного комплекса при их взаимодействии в общем сценарии работы;

- безопасное выполнение рабочих миссий вблизи дна и донных препятствий;

- получение на борту сопровождающего судна необходимой информации о состоянии систем

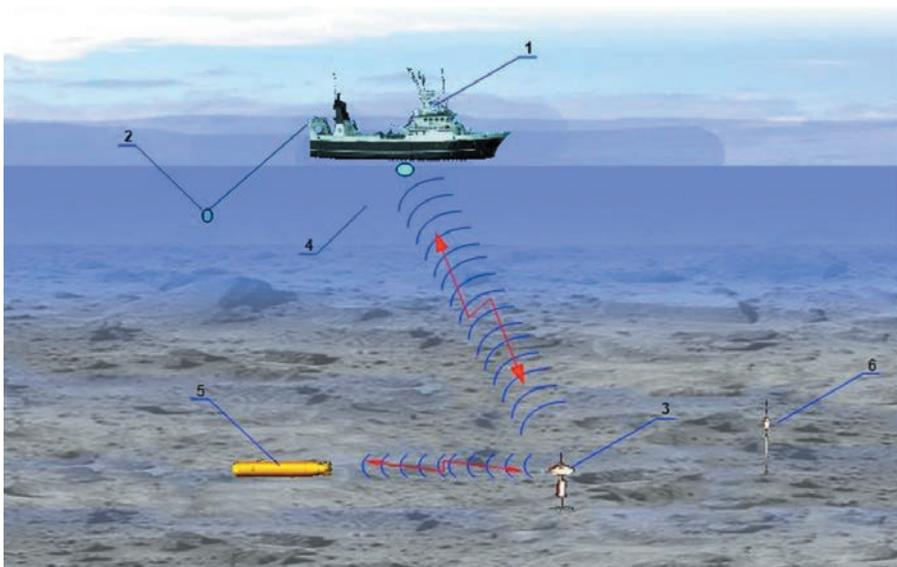


Рис. 3. Схема взаимодействия элементов комплекса: 1 – судно-носитель (судовая аппаратура управления); 2 – буксируемая судовая антенна; 3 – стационарная донная станция; 4 – судовой пеленгатор; 5 – АНПА; 6 – промерный зонд

АНПА и управление ходом миссии путем ее дистанционной коррекции по гидроакустическому каналу;

- обеспечение безотказной работы гидроакустического канала связи с использованием высокопроизводительных модемов (до 15–20 кб/с) и возможностью передачи в реальном времени визуальной информации, получаемой в процессе функционирования комплекса.

В навигационном комплексе глубоководного аппарата наибольшее значение приобретают гидроакустические системы. Необходимость увеличения дальности действия систем ведет к уменьшению рабочих частот и росту массогабаритных характеристик аппаратуры, в том числе и размещаемой на борту аппарата. Кроме того, значительно усложняются условия для обеспечения надежности гидроакустической связи и точности дальнометрии при наклонном распространении сигналов в глубоководных районах со сложной и слабо изученной гидрологией. С этой точки зрения классическая схема применения гидроакустической системы с длинной базой с установкой в районе работ комплекса донных маяков оказывается очень сложной и громоздкой.

Представляется целесообразным использовать для решения задачи специальную стационарную донную станцию как основное средство обеспечения глубоководных погружений АНПА и выполнения рабочих миссий в локальных районах [12]. Станция совместно с АНПА образует глубоководный исследовательский комплекс, причем станция выполняется с широкими функциональными возможностями. В первую очередь – это навигационно-информационная поддержка АНПА гидроакустическими средствами. Кроме того,

в составе станции могут быть размещены осмотровые и измерительные средства, предназначенные для получения первичной информации о районе предполагаемого применения АНПА. Основные системы донной станции и системы АНПА должны быть унифицированы. Станция должна иметь энергообеспечение, достаточное для организации канала информационного обмена дальнего действия с использованием низких частот. В структуре донной станции должны быть реализованы системы, обеспечивающие ее многократную постановку в районах применения АНПА.

Из назначения донной станции вытекают два режима ее работы:

- обеспечение высокочастотного информационного обмена в низкочастотном диапазоне по вертикальному каналу связи с обеспечивающим судном;

- информационный обмен с АНПА в придонном горизонтальном канале на более высоких частотах в установленном радиусе действия АНПА.

Станция устанавливается в районе работ АНПА и служит передаточным звеном в цепи доставки информации по маршруту: сопровождающее судно – буксируемая гидроакустическая антенна – стационарная донная станция – АНПА и обратно. Точность навигационной привязки всего комплекса достигается с помощью специально разработанной процедуры координирования и точного измерения текущих горизонтальных дальностей судовой гидроакустической антенны от станции.

Схематически процедуры информационного обмена между элементами комплекса выглядят следующим образом.

Для информационной связи между АНПА и ДСС, осуществляемой в условиях горизонтального

канала, может быть использована аппаратура высокочастотной системы связи (ГАСС ВЧ). Основным элементом системы является гидроакустический модем с дальностью действия до 3 км и скоростью передачи информации не менее 5 кбит/с.

С борта АНПА передаются телеметрические данные и форматизованные сообщения о работе инструментальных средств АНПА, а на борт АНПА поступают команды управления миссией. Дополнительные возможности дает канал гидроакустической навигации, который позволяет осуществлять передачу дальномерных данных и дублировать (в уменьшенном объеме) данные телеметрии и команды телеуправления.

В организации связи между ДСС и СБА участвуют оба канала: горизонтальный канал задействован аналогично тому, как сказано выше, а связь в вертикальном канале осуществляется с помощью низкочастотной системы связи (ГАСС НЧ). Последняя представляет собой постоянный гидроакустический модем с дальностью действия до 20 км и скоростью передачи данных не менее 3–4 кбит/с. Этот модем может быть использован также как гидроакустический дальномер. При необходимости дополнительно включается аппаратура навигационного канала (ГАНС) как резервный дальномер и транслятор телеметрической информации и команд телеуправления с дальностью действия до 10 км.

### *Техническое зрение и сенсоры*

В состав системы технического зрения АНПА могут входить разнообразные устройства, обеспечивающие обзор и съемку дна в зависимости от характера и цели проводимой работы, а также выработку визуальной информации,

необходимой для управления аппаратом. В наиболее полной конфигурации система представляет собой модульную интегральную систему, объединяющую гидролокаторы бокового, секторного (кругового) обзора, батиметрический гидролокатор, акустический профилограф, фото–видеосистемы, геофизические поисковые и измерительные устройства. В рамках проекта необходимо проведение детальных исследований по оптимальному составу системы и обоснованию характеристик ее компонентов.

Основу сенсорного комплекса составляют измерители гидрологических параметров, которые предназначаются для определения электропроводности, температуры, глубины и широко применяются при изучении и освоении природных ресурсов Мирового океана.

Дополнительно в состав АНПА должен быть включен промерный эхолот с дальностью действия не менее 500 м.

Измерение гидрохимических параметров воды в придонном пространстве производится с помощью датчиков кислорода, солености, pH, прозрачности, концентрации различных ионов металлов и т.д. Необходимо обоснование оптимального состава сенсоров АНПА и их характеристик с учетом работы в условиях предельных глубин.

### **Планирование движения и управление**

Одна из основных задач, решаемых АНПА в глубоководном районе, заключается в выполнении гидролокационной, фототелефизионной и профилографической обзорной съемки дна с последующим построением батиметрической карты и карт различных физических величин (температуры, солености, скорости звука, растворенного кислорода, метана и т.п.). Сценарий

использования АНПА для таких исследований в целом аналогичен сценарию выполнения ранее отработанных глубоководных обзорно-поисковых работ. Основное отличие заключается в необходимости поддержания постоянного информационного контакта с донной станцией. Этим обусловлены некоторые особенности сценария, заключающиеся в следующем.

На заключительном этапе погружения АНПА должен осуществлять процедуру активного поиска и наведения на ДС для установления с ней контакта и канала информационного обмена. При этом взаимодействие с судном-носителем ведется через ДС, поэтому траектории движения АНПА должны строиться и автоматически корректироваться таким образом, чтобы аппарат постоянно находился в зоне действия станции. Это необходимо как для слежения за АНПА с судна-носителя, так и для осуществления навигационной привязки получаемых данных. Отсюда следует, что для АНПА отсутствует задание (миссия) в обычном смысле этого понятия. Район работ определяется дальностью действия канала связи и зависит от конкретных акустических условий в месте установки ДС. Ряд других особенностей работы АНПА связан с преобладанием сложного рельефа, наличием аномальных магнитных полей и, возможно, других малоизвестных явлений.

Из общей постановки задачи следует, что архитектура информационно-управляющей системы (ИУС) в целом может быть организована по типу ИУС обзорно-поисковых аппаратов [13]. Эта архитектура содержит три уровня информационно-управляющего взаимодействия систем и библиотеку агентов, отвечающих за организацию различных процессов. Особенности глубоководной ра-

боты могут быть учтены в составе агентов и поведенческих функциях элементов тактического и исполнительного уровней ИУС. Так, задача автоматического приведения АНПА к донной станции решается одним из агентов библиотеки тактического уровня, алгоритмы которого реализованы и проверены в реальных морских операциях [5–9, 13, 14].

Отметим некоторые особенности формирования движения аппарата вблизи донной станции с целью покрытия области определенного радиуса сетью замкнутых траекторий. Форма и размеры этой области, зависящие от дальности связи, предварительно могут быть оценены путем моделирования. Одним из вариантов является движение АНПА по траектории, напоминающей спираль Архимеда (или прямоугольную спираль [15]), в центре которой находится ДС (рис. 4, а). Расстояние между витками спирали определяется шириной полосы обзора устройств технического зрения. Движение продолжается до потери связи с ДС, после чего АНПА либо прекращает миссию, либо возвращается к ДС для получения инструкций (команд) с судна-носителя. К достоинствам такого алгоритма движения следует отнести его простоту и anytime-характер построения траектории. Однако при спиралеобразном движении следует учитывать некоторые ограничения на работу исследовательских устройств.

Другой вариант планирования движения вблизи ДС состоит в задании двух симметрично развернутых меандров по обе стороны от ДС (рис. 4, б). Такое движение создает благоприятные условия для работы акустических средств и построения мозаик при картографировании района. При выполнении «меандра» каждый галс выполня-

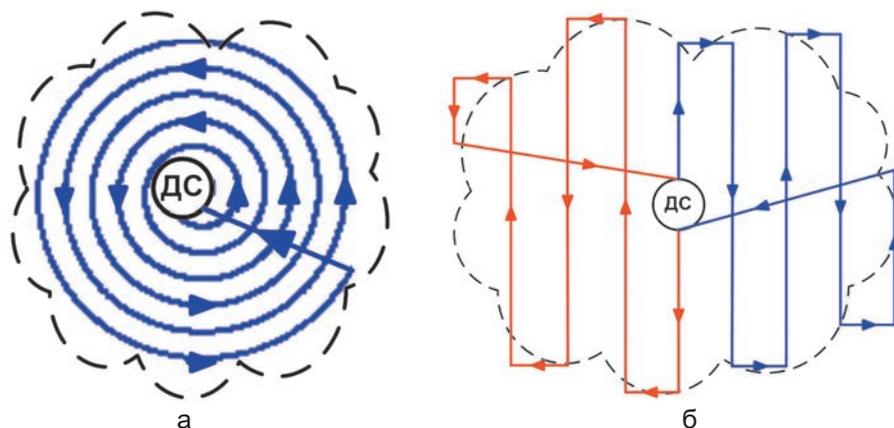


Рис. 4. Варианты траектории покрытия: а – спираль, б – симметричные прямоугольные меандры (красный – левый, синий – правый). Пунктирная линия – условные границы зоны связи с ДС

ется до тех пор, пока существует устойчивая связь с ДС, после чего аппарат переходит на обратный галс. Движение продолжается до полной потери связи с ДС, после чего аппарат возвращается к ДС и переходит к выполнению симметричного «меандра», если нет других инструкций.

Приведенный схематично сценарий движения предполагает, что аппарат и донная станция находятся на одном горизонте. Реально аппарат совершает пространственное движение в радиусе действия канала связи с ДС. При наличии препятствий АНПА должен маневрировать с переменной скоростью и стабилизировать с необходимой точностью курс и глубину (расстояние до дна) на ходу и на месте, осуществлять движение по траектории, формируемой в процессе обследования заданной области или аномального поля, при батиметрии и других измерениях по контурам и разрезам. Наибольшую проблему при разработке высокоорганизованной системы управления движением представляет формирование маршрута АНПА при сложном рельефе дна, характерном для глубоководных впадин и гор (гайотов). Как правило, для проведения гидролокационной и фототелевизионной съемки на малом расстоянии от дна требуется

движение по эквидистанте, и при наличии сложных препятствий аппарат должен эффективно маневрировать и выбирать безопасный маршрут, отслеживая при этом заложенную программой цель. Организация движения в среде с труднопреодолимыми препятствиями требует интеллектуализации не только систем навигации и управления, но и средств обнаружения и распознавания всех видов препятствий по маршруту движения. Приоритетной задачей является обеспечение безопасности аппарата, в особенности при движении в стесненном пространстве, получении неполной или недостаточно достоверной информации о внешней среде и состоянии самого аппарата. В условиях изменчивого рельефа целесообразно производить съемку по горизонтальным или радиальным разрезам. Для построения сети горизонтальных разрезов фактически требуется обеспечить движение по изобатам с обходом относительно простых препятствий, так что это может дать некоторые преимущества в отношении управляемости аппарата и энергозатрат на движение. Съемка по радиальным разрезам требует выполнения более сложных маневров, причем съемку целесообразно производить в два прохода. На первом проходе осуществляется обзорная

гидролокационная съемка на расстоянии от поверхности порядка 30–50 м, второй проход с фото- или видеосъемкой становится более трудным из-за необходимости обеспечивать эквидистантное движение на высоте 3–5 м от дна.

Система управления движением должна удовлетворять высоким требованиям по качеству динамических процессов, зависящих от тех режимов движения, которые должен осуществлять маневренный аппарат с гибким управлением.

Задачи управления в большинстве режимов движения решаются алгоритмическим (программным) путем и реализацией адаптивной структуры управления (регулятора), а для минимизации энергозатрат на движение необходимо, кроме того, минимизировать сопротивление на корпусе и хвостовом оперении, где обычно размещаются исполнительные органы (движители и рули).

### *Оценка основных технических характеристик проекта*

Анализ научно-технических и технологических проблем позволяет оценить технические характеристики основных составных частей глубоководного робототехнического комплекса, включающего АНПА, ДСС, СБА. Их основные характеристики представлены в табл. 4.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Исследование и освоение глубоководных районов океана и абиссали связано с решением принципиальных научно-технических и технологических вопросов создания надежных, долговременных multifunctional комплексов, включающих автономные, дистанционно управляемые

Таблица 4. Основные технические характеристики АНПА, ДСС, СБА

АНПА	ДСС	СБА
Максимальная глубина погружения – 12000 м Масса – 2000 кг Размеры – $\varnothing 0,8 \times 4,0$ м Скорость – 0–1,5 м/с Автономность – 24 ч Пробег – 50 км Энергоемкость литий-ионных батарей – 4–8 кВт·ч <i>Оборудование:</i> ГБО, промерный многолучевой эхолот, цифровая фотовидеосистема, донный акустический профилограф, датчики среды	Максимальная глубина погружения – 12000 м Масса – 3000 кг Размеры – $\varnothing 0,8 \times 5,0$ м Автономность – 36 ч Энергоемкость литий-ионных батарей – 8 кВт·ч  <i>Оборудование:</i> ГБО, цифровая фотовидеосистема, датчики среды, другие специальные измерители	Максимальная глубина погружения – 6000 м Масса – 100 кг Размеры – $\varnothing 0,8 \times 1,0$ м Длина кабеля – 10 км  <i>Оборудование:</i> датчик глубины, ГАНС, ГАСС НЧ

можных запасах минерального сырья (железомарганцевых конкреций и корок). Отработанные на практике глубоководные технологии с использованием АНПА могут найти применение в других, в настоящее время не выявленных глубоководных районах Мирового океана, а также подо льдами в Северном Ледовитом океане. Успехи в названной проблематике являются показателем технологического уровня развития страны, интегрируя достижения во многих сферах науки и техники, включая проблемы механики, материаловедения, энергетики, навигации, управления, вычислительной техники. Решение рассмотренного в работе комплекса проблем будет способствовать также укреплению национальной безопасности и научно-техническому развитию страны, интеграции глубоководных средств нового поколения в общую структуру средств освоения глубин Мирового океана.

и стационарные глубоководные аппараты и робототехнические системы. Рассмотренный в работе проект может быть положен в основу создания робототехнического комплекса, способного обеспечить решение многих назревших задач по освоению океанских глубин. При этом могут быть реализованы долговременные, протяженные системные исследования всех выявленных в настоя-

щее время глубоководных районов Мирового океана, а также поиск и обследование новых, недоступных в настоящее время, районов океанов и морей. Реализация проекта позволит получить новые знания о геологическом строении морского дна в районах глобальных разломов земной коры, органических процессах и явлениях, гидрологических особенностях в придонном пространстве, воз-

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов А.В., Армишев С.В. Исследования подводными роботами рифтовых и горных образований // Технические средства изучения мирового океана / Ин-т океанол. им. П.П. Ширшова АН СССР. М., 1983. С. 95–98.
2. Агеев М.Д., Инзарцев А.В., Киселев Л.В. Некоторые вопросы управления АНПА при обследовании подводных гор // Морские технологии. Владивосток, 2000. Вып. 3. С. 6–22.
3. Зенкевич Н.Л. Атлас фотографий дна Тихого Океана. М.: Наука, 1970. 134 с.
4. Волохин Ю.Г., Мельников М.Е., Школьник Э.Л. и др. Гайоты Западной Пацифики и их рудоносность. М.: Наука, 1995. 368 с.
5. Сагалевиц А.М. Океанология и подводные обитаемые аппараты. М.: Наука, 1987. 256 с.
6. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 398 с.
7. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 2(4). С. 5–14.
8. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Matviyenko Yu.V. et al. Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone // Motion Control. Vienna: InTech, 2010. P. 229–244.
9. Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. Автономные подводные роботы: Системы, комплексы, технологии // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2011. С. 162–179.
10. Пикуль В.В. Перспективы создания прочных корпусов глубоководной техники из стеклометаллокомпозиата // Судостроение. 2000. № 4. С. 14–16.
11. Пат. 2425776 Российская Федерация, МПК В63В 3/13. Водонепроницаемый прочный корпус подводного аппарата из стеклометаллокомпозиата / В.В. Пикуль, № 2010114421; заявл. 12.04.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.
12. Matviyenko Yu.V., Vaulin Yu.V. The navigation support of autonomous underwater vehicles for extreme ocean depths // 23-rd Saint Petersburg Conference on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, 2016. P. 422–424.
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. Павин А.М. Автоматическое приведение автономного подводного робота к гидроакустическому маяку // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 1(5). С. 32–38.
15. 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.