

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ МИНИАТЮРНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ И РОБОТОВ ЗА РУБЕЖОМ

А.Ю. Бочаров

Институт проблемных исследований
Российской академии
естественных наук, г. Серпухов

За последние два-три десятилетия в различных странах, занимающих ведущее положение в области морских технологий, было создано значительное число самоходных необитаемых подводных аппаратов (НПА), использующихся для решения широкого круга военных и гражданских задач. За этот период НПА продемонстрировали свою эффективность при выполнении противоминных, обзорно-поисковых и обследовательских работ и открыли ряд новых важных применений.

Самоходные необитаемые подводные аппараты (в иностранной литературе такие аппараты получили название UUV – Unmanned Underwater Vehicle) принято разделять на два больших класса: неавтономные

(привязные) НПА и автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА).

К неавтономным НПА относятся буксируемые и самоходные привязные подводные аппараты. Неавтономные НПА, имеющие в своем составе движительную установку (самоходные неавтономные НПА), за рубежом получили название *Remote Operated Vehicle*, или сокращенно ROV. В отечественной литературе эти аппараты наиболее часто называют дистанционно управляемыми НПА (ДНПА), или подводными телеуправляемыми аппаратами (ПТА) [1–4]. Причем наличие проводного канала энергообеспечения и телеуправления (кабель–связки) является принципиальным для отнесения аппарата к этому классу (ДНПА–

ПТА–ROV). Самоходные НПА могут быть плавающими в толще воды, самоходными донными или с комбинированным типом движения. Далее под неавтономными НПА будут пониматься только самоходные аппараты.

К автономным необитаемым подводным аппаратам (АНПА) относятся самоходные НПА с автономной системой энергообеспечения и, как правило, беспроводным каналом телеуправления и связи. Самоходные НПА с проводным каналом управления и связи (обычно на основе волоконно-оптической линии связи) относятся к полуавтономным аппаратам. Примером такого полуавтономного НПА может служить аппарат проекта «NMRS» (Nearterm Mine Reconnaissance System), разработанный компанией Northrop Grumman по заказу ВМС США [5].

К настоящему времени самоходные НПА сформировались в достаточно представительный класс робототехнических средств, насчитывающий ~500-600 различных проектов, причем общее количество созданных (построенных) за рубежом



Рис. 1. Характеристика активности зарубежных стран в разработках НПА (получена на основе обработки сведений о 421-м проекте НПА)



Рис. 2. Внешний вид современных неавтономных НПА различных классов

аппаратов уже превысило 5000. Мировыми лидерами в разработке самоходных НПА являются: США, Великобритания, Канада, Франция, Германия и Япония (рис. 1).

Неавтономные НПА являются наиболее представительными по сравнению с АНПА и уже прочно закрепившимися на мировом коммерческом рынке.

По целевому назначению и особенностям технического оснащения неавтономные НПА гражданского назначения разделяют на следующие классы (рис. 2):

■ **1. Подводные микроаппараты (ПМА).** Этот класс неавтономных НПА (micro-ROV) сформировался относительно недавно и объединяет аппараты, масса которых не превышает 5 кг. Как правило, ПМА предназначены для выполнения обзорно-поисковых работ на глубинах до 100–150 м.

■ **2. Подводные малогабаритные аппараты** (неавтономные самоходные подводные аппараты класса мини – mini-ROV). Представителями данного класса являются самоходные НПА, масса которых находится в пределах от 5 до 20–30 кг.

Примечание. Надо отметить, что разделение неавтономных НПА на классы «микро» и «мини» уже давно используется в зарубежной литературе. Однако в настоящее время такая классификация не имеет четких границ и не может являться однозначной. Аппараты этих классов можно отнести к изделиям микросистемной техники, сформировавшимся в результате миниатюризации всех систем обитаемых подводных аппаратов (НПА). Учитывая данное обстоятельство, в статье используется следующая условная классификация неавтономных НПА (по

массе аппарата в воздухе): микро (масса менее <5 кг), «мини» (масса 5–30 кг), легкие (масса 30–500 кг), средние (масса 500–5000 кг), тяжелые (масса свыше 5000 кг).

■ **3. Основной класс.** Аппараты данного класса предназначены для решения поисковых, инспекционных и осмотровых задач, выполнения легких механических работ в толще воды и проведения измерений параметров водной среды. НПА основного класса имеют следующие типовые характеристики:

- максимальная рабочая глубина до 3000 м (в большинстве проектов до 1000 м);
- радиус действия (максимальное удаление от обеспечивающего судна): 100–150 м (в редких случаях до 1000 м);
- скорость подводного хода 1–2,5 узла.

Таблица 1. Основные сведения о зарубежных моделях ПМА

Страна	Разработчик	Название аппарата	Макс. рабочая глубина, м	Масса, кг	Скорость хода, узл.
Великобритания	AC-CESS	AC-ROV SP50	75	3	1,5
Канада	Inuktun Services Ltd	SCALLOP	40	4	2
США	Underwater Vehicle Corp	VR 250	75	3,6	2
США	VideoRay	VideoRay Deep Blue XE	300	4	0-2
США	VideoRay	Videoray Explorer	90	4	0-2
США	VideoRay	Videoray Pro II	150	3,5	0-2
США	VideoRay	Videoray Pro III	150	4	0-2
США	VideoRay Inc	VideoRay Pro III XE GTO	150	4	0-4
США	VideoRay Inc	VideoRay Scout	90	3,5	0-2
Франция	ADHOC-VISION	Observer 21	100	5,0	0-2
Чили	Mariscope Chilena	Gnom	100	3	
Чили	Mariscope Chilena	MICRO	300	2	1,6

НПА основного класса имеют массу от 20 до 350 кг.

■ **4. Рабочий класс.** Аппараты этого класса предназначены для решения широкого круга подводно-технических работ (аварийно-спасательных, поисковых, инженерно-строительных и ремонтных). Рабочий класс составляют аппараты массой от 30 до 6000 кг (легкие, средние и тяжелые) с достаточно сложным навесным оборудованием.

■ **5. Донные** (самоходные донные НПА). Этот класс составляют аппараты на гусеничном ходу, предназначенные для проведения тяжелых механических работ на морском дне.

К числу достоинств неавтономных НПА по сравнению с АНПА следует отнести:

1. Большую продолжительность непрерывной работы (энергоснабжение этих аппаратов осуществляется либо с борта обеспечивающего судна, либо при помощи берегового оборудования);

2. Возможность выполнения сложных и тяжелых механических работ в толще воды и на донной поверхности.

3. Относительно низкую стоимость постройки и эксплуатации (существенно меньшая сложность конструкции по сравнению с АНПА одного и того же класса);

4. Высокую надежность конструкции (отсутствие риска от невозвращения).

Характеристика распределения современных проектов неавтономных НПА по предельным рабочим глубинам представлена на рис. 4.

Как показал проведенный анализ зарубежных проектов неавтономных НПА, аппараты класса «микро» (micro-ROV) составляют менее 3-4% от общего их числа. Однако объем их продаж из года в год стремительно увеличивается. Лидером в объемах серийно выпускаемых ПМА является компания «VideoRay» (США), поставившая на мировой рынок более 600 комплексов. Основные сведения о зарубежных моделях ПМА представлены в табл.1.

Ниже кратко рассмотрены модели ПМА, являющиеся коммерчески доступными на мировом рынке.

ПМА «VideoRay», разработанный компанией VideoRay Inc., США. Масса аппарата составляет 3,6 кг (рис. 3). Продажа ПМА «VideoRay» осуществляется в шести различных комплектациях стоимостью от 6000 до 46 000 тыс. дол. США [6].

Рис. 3. Внешний вид ПМА «VideoRay» в комплектации «Scout»



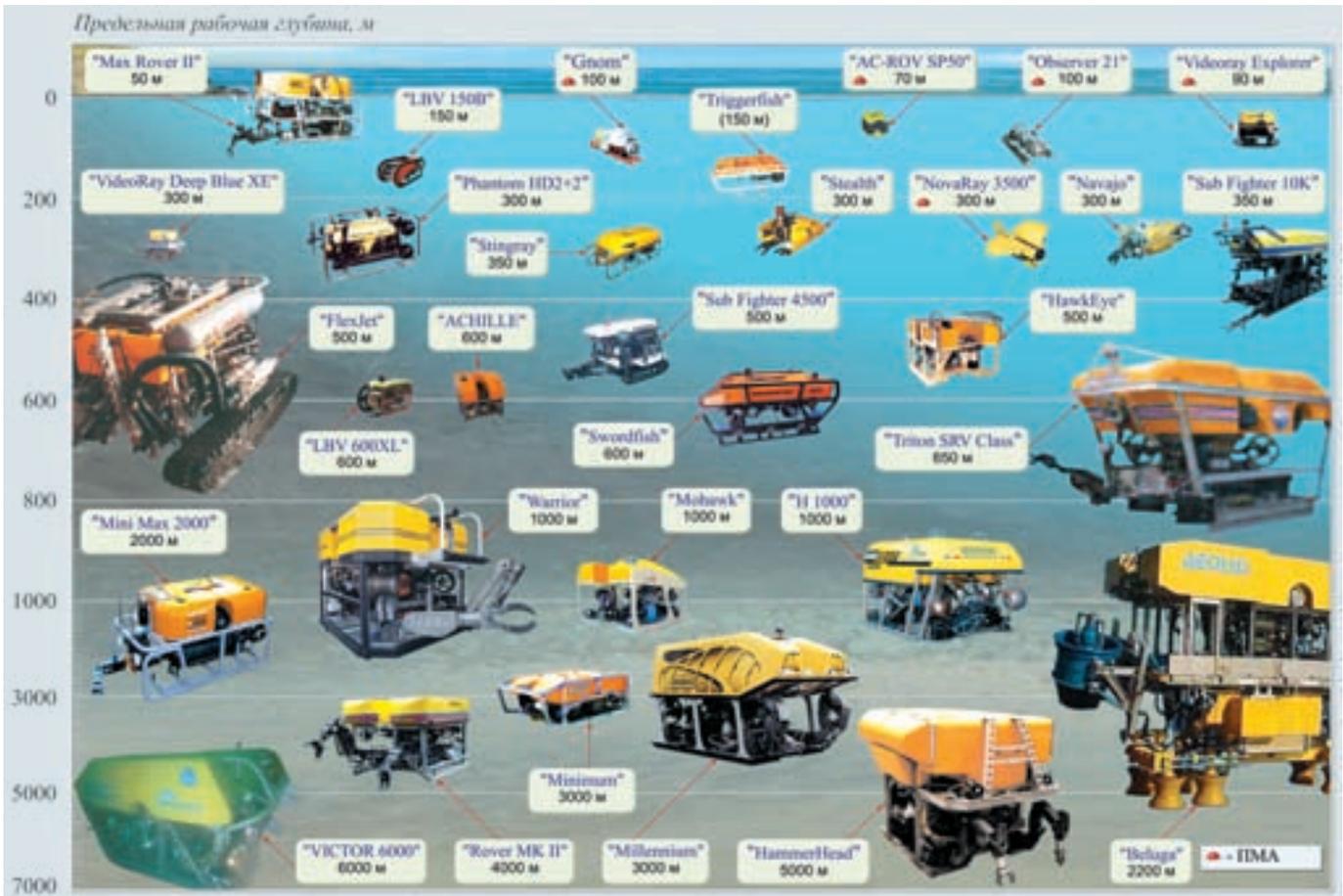


Рис. 4. Характеристика распределения современных проектов НПА по предельным рабочим глубинам

Рис. 5. Внешний вид ПМА серии «LBV-150»



Рис. 6. Внешний вид ПМА «Observer 21»



ПМА серии LBV 150/300 (рис. 5), разработанный компанией «SeaBotix», США. Масса аппаратов составляет ~11–13 кг (в зависимости от комплектации и рабочей глубины). Их стоимость колеблется от 13 до 40 тыс. дол. США.

ПМА «Observer 21», разработанный компанией «ADHOC-VISION», Франция. Масса аппарата составляет 5 кг, рабочая глубина – до 90 м (рис. 6).

ПМА «AC-ROV SP50», разработанный компанией «AC-CESS Co Ltd.», Великобритания (рис. 7). Аппарат способен осуществлять обзорные работы на глубинах до 75 м и имеет массу ~ 3 кг.

ПМА «ГНОМ» (масса 2,0–3,5 кг), разработанный Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН совместно с ООО «Ин-



Технические характеристики:

Предельная рабочая глубина.....	75 м
Объем	4,5 дм ³
Масса	3 кг
Число двигателей	6
Длина кабеля	120 м
Диаметр кабеля	9,2 мм
Видеокамера	
цветная	520 твл, 0,1 люкс

Рис. 7. Внешний вид ПМА «AC-ROV SP50»



Технические характеристики:

Число двигателей	3 (4)
Длина кабеля	100 м
Диаметр кабеля	2 мм
Скорость перемещения	1 м/с
Видеокамера	
цветная	470 твл, 1 люкс
Осветители	светодиоды 15 шт.
Дальность видения	4-5 м (в темноте в прозрачной воде)
Объем	2,5 дм ³
Масса	2 кг

Рис. 8. Внешний вид ПМА «ГНОМ»



Технические характеристики:

Число двигателей	3 (4)
Длина кабеля	80 м
Диаметр кабеля	2 мм
Скорость перемещения	1 м/с
Видеокамера	
цветная	470 твл, 1 люкс
Осветители	светодиоды 15 шт.
Дальность видения	4-5 м (в темноте в прозрачной воде)
Объем	2,5 дм ³
Масса	3 кг

Рис. 9. Внешний вид ПМА «GNOM», выпускаемого компанией «Mariscope Chilena»

дэл» [7]. Аппарат предназначен для проведения подводных осмотровых работ на глубинах до 80–100 м (рис. 8). В зависимости от комплектации стоимость ПМА колеблется в пределах 4–8 тыс. дол. США.

Практически точной копией конструкции этого аппарата является ПМА «GNOM» (рис. 9), производимый компанией «Mariscope Chilena», Чили (вероятно, это филиал компании «Mariscope GmbH», Германия). Любопытным является и тот факт, что данный аппарат имеет идентичное название.

Для сравнения в табл. 2. представлены сведения о тех-

нических характеристиках и составе аппаратуры трех практически идентичных коммерчески доступных ПМА.

Наряду с достоинствами, неавтономные НПА (в т. ч. и класса «микро») обладают и целым рядом недостатков, основными из которых являются:

1. Полная зависимость функционирования аппарата от обеспечения судна (судна-носителя) или берегового надводного оборудования;

2. Ограниченный длиной кабеля-связки радиус действия аппарата;

3. Необходимость наличия на борту обеспечивающего суд-

на устройства управления натяжением кабеля-связки (во время волнения моря);

4. Сложность управления аппаратом в условиях сильных течений, завалов и узкостей.

Указанные выше недостатки, а также достижения в области энергетики, электроники и информационных технологий послужили мощным стимулом к стремительному развитию НПА автономного класса. За последние 5–10 лет количество разработок АНПА выросло более чем 2 раза. К началу 2006 г. в мире насчитывалось более 140 проектов автономных аппаратов различного целевого назначения. Однако их общее количество еще невелико и оценивается специалистами в пределах 500–600 единиц. Наибольшая часть из них относится к малогабаритным АНПА (масса аппарата менее 50 кг). Самыми быстрыми темпами разработка и производство автономных аппаратов осуществляются в интересах оборонных ведомств зарубежных государств [8–10].

Примечание. Перспективными планами Министерства обороны США определено, что к 2013 г. в боевом составе ВМС США будет находиться ~ 100 000 (!!!) АНПА.

В целях упорядочения и систематизации информации о зарубежных проектах были выбраны следующие, с нашей точки зрения, наиболее общие и существенные, классификационные признаки АНПА: назначение, массогабаритные характеристики, конструктивные особенности несущей конструкции. В соответствии с этими признаками все проекты АНПА можно классифицировать следующим образом.

1. По основному целевому назначению проекта: военного назначения, гражданского/коммерческого, двойного назначения и экспериментальные.

2. По массе подводных аппаратов в воздухе (рис. 10):

Таблица 2. Основные технические характеристики базовых вариантов коммерчески доступных ПМА

Технические характеристики и состав комплекса ПМА	Модель ПМА		
	AC-ROV SP50	VideoRay Explorer	“ГНОМ”
			
Разработчик, страна	AC-CESS Co Ltd., Великобритания	VideoRay Inc., США	Институт океанологии РАН, Россия
Рабочая глубина, м	75	76	100 (120 макс.)
Габаритные размеры ПМА, см	20,3×15,2×14,6	35,5×22,5×21	32,0×15,0×12,0
Объем аппарата, см ³	4 500	16 540	
Масса ПМА, кг	3,0	3,6	3,0
Общее число двигателей: - горизонтальных - вертикальных	6 4 2	3 2 1	3(4) 2 1 (2)
Общая потребляемая мощность (для комплекса), Вт	300	300	150
Напряжение питания	100-240 В (50/60 Гц) 36 В	100-240 В (50/60 Гц) 48 В	220 В (50 Гц) 12 В
Напряжение питания, подаваемое на аппарат, В	36	48	180
Цветная видеокамера	480 ТВЛ (0,1 люкс)	570 ТВЛ (0,3 люкс)	570 ТВЛ (0,1 люкс)
Осветители	4×12 светодиодов		35 (белого цвета)
Навигационное оборудование ПМА	Датчик глубины (опция)		Датчик глубины, компас
Встроенные датчики	Температуры и герметичности	Гидролокатор кругового обзора (масса ~ 280 г)	-
Диаметр кабеля (нейтральная плавучесть), мм	9,3 (опционально 6,3)	10,0	3 (отрицательная плавучесть)
Диагональ монитора оператора, мм	145 (стандартно)	127 (стандартно)	152 (стандартно)
Длина кабеля, м	80	76	200
Общая масса всей системы, кг	< 15 (Один переносной чемодан)	~ 45 (Два переносных контейнера)	~ 18 (Два чемодана типа Pelican)

Автономные подводные микроаппараты (АПМА)

К этой категории относятся аппараты массой менее 20 кг. В зарубежных публикациях такие аппараты получили название «micro-AUV». Данная категория составляет ~20–25% от общего числа известных проектов АНПА. Большая часть (~50–60%) моделей АПМА создается с использованием бионических принципов и носит экспериментальный характер.

Для этой категории аппаратов типовыми техническими характеристиками являются следующие: дальность плавания не более 1–2 мор. мили; предельная рабочая глубина менее 150 м; скорость хода ~1,5–2 узла.

Мини-АНПА

Эта категория объединяет аппараты, масса которых находится в пределах 20–100 кг (~15–20% от общего числа зарубежных проектов АНПА). Диапазон дальности плавания

мини-АНПА категории весьма широк и находится в пределах от 0,5 до 4000 (!!!) мор. миль. Наиболее известными представителями этого класса являются аппараты проектов «Sea Glider», «Slocum Glider I/II» и «Spray Glider» (аппараты с системой движения на основе остаточной плавучести).

Малые АНПА

К этой категории относятся АНПА, масса которых находится в пределах 100–500 кг. Ти-



Рис. 10. Категории АНПА

типичными представителями АНПА малого класса являются проекты AQUA EXPLORER 2 (Япония), Odyssey III (США), Ocean Explorer (США), BRAUV (США) и SAUV II (США).

Средние АНПА

К этой категории относятся аппараты с массой от 500 до 2000 кг. Типичными представителями АНПА среднего класса являются проекты ARCS (Канада), REMUS 6000 (США),

HUGIN 1000/3000 (Норвегия), Wayamba (Австралия).

Большие АНПА

Эта категория аппаратов, масса которых превышает 2000 кг. Примерами таких АНПА могут служить следующие проекты Alistar 3000 (Франция), AutoSub (Великобритания), SEAHORSE (США), LAZARUS (США).

3. По особенностям формы несущей конструкции АНПА

бывают (рис. 11): цилиндрической (торпедообразные, поплавковые с улучшенной гидродинамической конфигурацией и плоские), на бионических принципах (плавающего и ползающего типов), планерные (самолетной формы), с солнечной панелью на верхней части корпуса [12, 13], самоходные (ползающие и плавающие) роботы.

Надо отметить, что первая официальная классификация



Рис. 11. Классификация АНПА по особенностям несущей конструкции

Таблица 3. Типовые технические характеристики для категорий АНПА военного назначения

Категория АНПА военного назначения	Диаметр, см	Водоизмещение, т	Продолжительность автономного плавания		Типовой объем полезной нагрузки, см ³
			при макс. полезной нагрузке, ч	при низкой полезной нагрузке, ч	
Малогобаритный (переносной)	7,62–22,86	<0,0454	< 10	10–20	<4,1
Легкий	32,39	~ 0,2268	10–20	20–40	16,4–49,2
Тяжелый	53,34 (21)	< 1,361	20–50	40–80	65,6–98,2
Большой	>91,44	~ 9	100–300	>>400	245,8–491,61+ внешние средства (напр., буксируемые)

АНПА военного назначения была опубликована в Комплексном плане развития необитаемых подводных аппаратов ВМС США (*The Navy Unmanned Undersea Vehicle Master Plan, Department of the Navy, USA, November, 9, 2004*) [14]. Этим документом определено 4 класса (категории) АНПА: малогобаритные (переносные); легкие; тяжелые и большие. Типовые технические характеристики аппаратов этих категорий представлены в табл. 3.

Рассмотрим некоторые особенности и основные тенденции развития автономных подводных микроаппаратов и микроботов. В зарубежных публикациях такие аппараты получили название «*micro-UUV*» (*Unmanned Underwater Vehicle*) – дословно: необитаемый подводный микроаппарат. Позднее появился термин *micro-AUV* (автономный подводный микроаппарат – автономный ПМА). Наибольшая активность исследований и разработок (по числу патентов и публикаций в научно-технической литературе), посвященных проблемам создания АПМА, наблюдается в США, Японии, Сингапуре, Канаде и Исландии.

Мировыми лидерами в разработках автономных подводных микроаппаратов и микроботов являются следующие научно-исследовательские организации и университеты:

- *Nekton Research LLC*, США;
- *Marine Science Center of Northeastern University*, США;
- *Massachusetts Institute of Technology (MIT Dept. of Ocean Engineering)*, США;
- *DUKE & NC State University Team*, США;
- *iRobot Corp.*, США;
- *Office Naval Research (ONR)*, ВМС США;
- *Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU*, Сингапур;
- *Mobile Robotics Lab at McGill University*, Канада;
- *Inuktun Inc.*, Канада;
- *Hyland Underwater Vehicles*, Канада;
- *Essex University*, Великобритания;
- *Osaka University u Shinshu University*, Япония.

В настоящее время в эксплуатации находится незначительное число типов ПМА. Преимущественно это разработки *Nekton Research LLC (США)*, *iRobot Corp. (США)* и *Inuktun Inc. (Канада)*.

К числу наиболее известных проектов АПМА указанных компаний можно отнести:

■ 1. АНПА «*Ranger*», разработанный компанией «*Nekton Research LLC*» (рис. 12). Аппарат при длине 0,91 м и диаметре 0,09 м имеет массу в базовой конфигурации ~ 4,5 кг. Максимальная продолжительность его автономной работы составляет 4 ч при средней скорости движения 2–4 узла.

■ 2. АНПА «*TransPhibian*» является совместной разработкой компании «*Nekton Research LLC*» и *ONR (Отдел научных исследований ВМС США)*. Конструкция аппарата создана на бионических принципах (прототипом является проект *Madeleine*, компании «*Nekton Research LLC*») и обеспечивает произвольные движения как в придонном пространстве, так и по донной поверхности.

Его автономность составляет 0,75–1,25 ч, а предельная рабочая глубина не превышает 100 м. Другими ближайшими аналогами этого аппарата являются наземный самоходный робот RHex и его подводная модификация AQUA (рис. 13), созданные в рамках совместных проектов университетов Канады (*Mobile Robotics Laboratory of University McGill*) и США (*University of Michigan*).

В движительно-рулевым комплексе аппарата используются хорошо отработанные двигатели типа *Nektor™*, изготовленные по заказу Отдела научных исследований ВМС США (*Office Naval Research – ONR*). Такие двигатели получили положительную оценку в конструкциях АНПА таких проектов, как *BASS, GAMERA*, а также в подводных микроаппаратах серии *MicroHunter*.

■ 3. АНПА – робот «*Sea Talon*» (*Surf Zone Crawler*), разработанный компанией «*Foster Miller Inc*» [15]. Этот ползающий аппа-



Рис. 12. Внешний вид АНПА «Ranger»

рат является модификацией наземного робота «Talon» (более ранняя модель имеет название LEMMING), адаптированной к работе на глубине до 30,5 м (рис. 14). Для решения задач нейтрализации мин этот подводный робот может оснащаться специальным манипулятором – контактным тралом.

Как показал анализ обширного числа научно-технических публикаций, основными объектами исследований и разработок в области создания АПМА являются следующие:

- системы энергообеспечения (поиск путей создания емких и возобновляемых энергоисточников в миниатюрном исполне-

нии, в т. ч. на основе топливных элементов);

- движительно-рулевые комплексы (разработка нетрадиционных систем движения аппарата, как правило, на базе одного двигателя);

- конструкции ПМА на бионических принципах (поиск бионических решений – потенциально эффективных биологических аналогов, с точки зрения целевых задач и тактико-технических требований к подводному микроаппарату, и конструкторских решений для их технической имитации). В рамках этих исследований осуществляются попытки технической имитации органов переме-

щения и гидродинамических форм биологических объектов [16, 17];

- миниатюрные системы управления движением (создание эффективной реконфигурируемой распределенной архитектуры системы управления и интеллектуального программного планировщика), сочетающих в себе автономный и супервизорный режимы;

- бортовые автономные системы навигации (БАНС) в миниатюрном исполнении (создание БАНС в микромодульном исполнении, включающую ИНС, приемник сигналов спутниковой радионавигационной системы и устройство обработки информации);



Рис. 13. Внешний вид роботов «RHex», «AQUA» и «TransPhibian»



Рис. 14. Внешний вид роботов «Talon» и «Sea Talon»

- комплексированные системы технического зрения (комплексирование миниатюрных видеокамер, магнитных и акустических датчиков для их интеграции в систему управления движением);
- миниатюрные датчики и различные преобразователи сигналов (миниатюризация измерительных средств на основе использования технологий микро-системной техники).

Как показали результаты проведенного анализа, класс зарубежных АПМА насчитывает ~ 33–34 проекта, как правило, не являющихся коммерчески доступными. Основные ха-

рактеристики зарубежных АНПА класса «микро» представлены в табл. 4.

Внешний вид основных проектов ПМА, перечисленных в табл. 4, представлен на рис. 15. Среди самых миниатюрных подводных аппаратов можно выделить АПМА серии *MicroHunter*. В 1999–2002 гг. по заказу Управления перспективных исследований и разработок Министерства обороны США (*DARPA*) научное подразделение *Nekton Research LLC* (входит в состав компании «*Nekton Technologies Inc.*», США) совместно с *Duke*

University, США разработало серию конструктивно масштабируемых подводных микроаппаратов под названием «*MicroHunter*» (рис. 16). Микроаппараты имеют длину 5–20 см и предназначены для отработки концепций применения группировок из миниатюрных подводных роботов для обнаружения целей, целеуказания и наведения торпедного оружия, а также мониторинга свойств водной среды (измерение температуры, солености и т. д.

Один из действующих макетов, предназначенных для обзорно-поисковых работ, име-

Таблица 4. Основные характеристики зарубежных АНПА класса «микро»

Страна	Разработчик / судостроитель	Модели АНПА	Тип несущей конструкции корпуса	Максимальная рабочая глубина, м	Габариты (ДхШхВ), м	Масса аппарата, кг	Скорость хода, узлы	Дальность хода, м. миль.	Продолжительность автономного плавания, ч
Австралия	Canberra's Australian National University	Serafina	Т	5000	0,21×0,10×0,14	–	–	–	10
Великобритания	Essex University	MT1	Б (плав)	10	0,48×0,215×0,15	3,55	–	–	–
Канада	Mobile Robotics Lab at McGill University	AQUA	Б (плав)	10-15	–	20	–	–	–
Канада	Inuktun Services Ltd	Micro MaG Crawler (гидроакустическим каналом управления)	С (полз)	<2	0,203×0,165×0,06	4,5	–	–	–
Канада	Hyland Underwater Vehicles	MicroSeeker	Т	–	–	<5	–	–	–
Сингапур	Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU	АМОЕБОТ	Б (плав)	–	–	–	–	–	–

Окончание таб. 4

Страна	Разработчик / судостроитель	Модели АНПА	Тип несущей конструкции корпуса	Максимальная рабочая глубина, м	Габариты (Д×Ш (д – диаметр)×В), м	Масса аппарата, кг	Скорость хода, узлы	Дальность хода, м. миль.	Продолжительность автономного плавания, ч
Сингапур	Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU	ROBO-EEL	Б (плав)	–	–	–	–	–	–
Сингапур	Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU	ROBOGLIDER	Б (плав)	–	–	–	–	–	–
Сингапур	Modular robotic & Robot locomotion Group, School of MPE, NTU	Underwater walking robot	Б (полз)	–	–	–	–	–	–
США	iRobot Corp	Ariel I и II	Б (полз)	8-10 (45)	0,55(1,15) × 0,09(0,15) × ?	11	–	–	–
США	iRobot Corp	DART	Б (плав)	10-20	–	<15	–	–	–
США	Cal-Tech	Dongle	Б (плав)	< 3	0,6×0,4 (с рулями) ×0,25	2,3	0,1	–	–
США	Sippican Inc	EMATT (Мк 39 учебная цель)	Т	50	0,915×0,124 (д)	10	–	–	–
США	DUKE & NC State University Team	Gamera	Б (плав)	<10	–	5-6	–	–	–
США	Nekton Research LLC	MicroHunter	Т	< 100	18-35 × ? (д)	0,07	2	>16	–
США	JW Fishers Inc	Pipe Inspection Camera (PIC-1)	типа ROV	–	0,71×0,2 (д)	–	1,2	–	–
США	Nekton Research LLC	Ranger	Т	<100	0,91×0,09 (д)	4,5	2-4	10	4
США	Marine Science Center of Northeastern University и Massa Products Corporation	Robo Lobster	Б (полз)	600	–	13	–	–	–
США	MIT's Dept. of Ocean Engineering	Robopike (Wanda)	Б (плав)	10-20	0,81×0,1×0,15	3	–	–	–
США	MIT's Dept. of Ocean Engineering	Robotune	Б (плав)	–	–	–	–	–	–
США	ONR, NAVSEA, DARPA и Foster-Miller	Sea Talon	С (полз)	0,5-10	0,6×0,51×0,17	<20	1-3	10	–
США	ONR и Nekton Research LLC	Transphibian (на базе Madeleine)	Б (плав-полз)	100	0,6×0,3×0,15	20-22	1,5	–	0,75-1,25
США	Marine Science Center of Northeastern University	Undulatory Robot	Б (плав)	–	–	<20	–	–	–
США	Systems Engineering Department USNA	USNA-1	Т	100	0,61×0,089	2,5-2,7	–	–	–
США	University of Colorado at Denver	Water Buffalo	–	–	–	–	–	–	–
США	Nekton Research LLC	Madeleine	Б (плав – полз)	100	0,6×0,3×0,15	20	1,5	–	0,75-1,25
США-Япония	ONR (США) и Osaka University, Shinshu University (Япония)	Underwater robot (США-Япония)	Т	100-200	1,36×0,12	14,5	–	–	–
Япония	MHI	RoboFish	Б (плав)	<10	0,5 × ? × ?	2,5	–	–	0,5

Условные обозначения: Т – торпедообразная форма (в т. ч. с улучшенной гидродинамикой); П – плоская форма несущей конструкции; С (полз) – самоходный (гусеничный) аппарат; Б (плав) – бионическая форма аппарата плавающего типа; Б (полз) – бионическая форма аппарата ползающего типа.

ет длину 20 см, диаметр корпуса ~5 см, глубину погружения до 100 м и развивает скорость до 2 узлов. В состав системы энергообеспечения входит аккумуляторная батарея (элемент питания) типа АА, обеспечивающая автономность пла-

вания в пределах 3 ч (соответствует дальности хода до 10 км). Самый миниатюрный аппарат серии *MicroHunter*, с дальностью действия ~ 30 км, имеет длину всего 5 см и массу ~5 г.

В своих разработках *Nekton Research LLC* применила ряд

оригинальных конструкторских решений, которые позволили обеспечить высокую маневренность *MicroHunter* (в качестве рулей используется только одна подвижная часть). Кроме того, встроенные в них системы управления обеспечивают эффек-



Рис. 15. Внешний вид проектов автономных подводных микроаппаратов и микророботов

тивное применение достаточно большой группировки *Micro-Hunter* (более 50 микроаппаратов) для решения задач сбора трехмерной информации о подводных объектах.

Надо отметить, что большая часть перспективных ПМА раз-

рабатывается на бионических принципах (с использованием результатов исследований в области бионики). Бионика (от греч. *bios* – элемент жизни, буквально – живущий) – одно из направлений биологии и кибернетики, изучающее особенности

строения и жизнедеятельности организмов для создания более совершенных технических систем или устройств. Конечной целью бионики является перенос в технику лучших достижений (бионика как наука зародилась в начале 60-х гг. прошлого сто-



Рис. 16. Внешний вид макетных образцов подводных микроаппаратов серии «MicroHunter»

летия, а первая конференция по бионике в нашей стране прошла в 1962 г.).

В зарубежных публикациях это направление получило название биомимикрия – *biomimetic* (мимикрия (от англ. *mimicry*, от греч. *mirnicos* – подражательный) – подражательное сходство незащищенного организма с защищенным или несъедобным; один из типов покровительственной окраски и формы. Биомимикрия – подражание живой природе.

Данное комплексное (междисциплинарное) направление работ сформировалось на базе результатов синергетических исследований (системного обобщения достижений биологии, математики, информатики, электроники, механики, материаловедения и технологий микроминиатюризации и робототизации). К числу основных задач этого направления относится разработка новых материалов, процессов, технических устройств на основе принципов биологической имитации.

Изучение биологических систем на различных уровнях (от организмов млекопитающих до насекомых) представляет особый интерес с точки зрения технической имитации их способностей видеть (в т. ч. и ночью), чутко слышать, различать запахи, ощущать вкус и ориентироваться в сложных условиях.

Надо отметить, что высокая практическая значимость для США ожидаемых результатов этих исследований позволила определить в 1995–1996 гг. это направление как приоритетное [18]. В американских публикациях достаточно часто встречается еще понятие и «*reverse engineering*» – «обратная инженерия», являющееся синонимом для биокибернетики.

В рамках общего направления «Биомимикрия» выделяются следующие группы исследовательских работ:

1. Общесистемные исследования;
2. Исследования по созданию датчиков (чувствительных элементов), актюаторов (исполнительных механизмов), материалов и веществ на биомимикрических принципах;
3. Исследования по применению биологических объектов, созданию гибридных (на базе живых организмов) и биомимикрических систем.

Общесистемные исследования ориентированы на изучение:

- способов переработки информации в нервной системе;
- особенностей строения и функционирования органов чувств и двигательных систем;
- принципов навигации, ориентации и локации;
- внутренних процессов в строении организмов, обладающих уникальными способностями (например, высоким коэффи-

циентом полезного действия).

Данные исследования позволяют выявить [19]:

- части тела, органы, нервные системы биологических объектов (млекопитающих, птиц, рыб, насекомых), которые позволяют выполнять функции, аналогичные создаваемой системе. Другими словами, исследования дают возможность найти конкретные виды организмов, способных по своим свойствам (условиям обитания, жизненным функциям и пр.) служить прототипом для технической имитации (подражания) или для непосредственного использования;
- основные компоненты и взаимосвязи между ними, которые необходимы для построения функциональной биомимикрической (бионической) модели;
- математические и физические модели для получения статических и динамических характеристик объектов.

К числу последних достижений, полученных в рамках подобных исследований, можно отнести создание в США робота, действиями которого управляет мозг угря. Пока механическая конструкция робота достаточно проста. Он реагирует (осуществляет поворот) на направление светового излучения с помощью сигналов, поступающих от мозга угря. Мозг был извлечен из рыбы и сохраняется живым в специальном

химическом растворе. Создание этой системы связи уже назвали революцией в кибернетике, сравнимой, например, с клонированием.

Большой объем научных исследований по созданию миниатюрных подводных роботов проводится в рамках американской комплексной программы «Подводные роботы на биомимикрических принципах – *Biomimetic Underwater Robot*» [20]. Руководство этой программой осуществляется Департаментом электроники и вычислительной техники США с привлечением Центра морских наук (*Marine Science Center*) и Бостонского северо-восточного университета. Основной целью программы является создание полностью автономных подводных роботов, имитирующих

принципы движения морских биологических объектов. Ожидается, что полученные результаты найдут широкое применение при решении различного рода задач, например:

- обнаружение донных (в т. ч. и заиленных) мин на мелководье;
- проведение осмотрово-инспекционных работ;
- сбор информации с автономных донных станций;
- освещение подводной обстановки;
- поддержка аварийно-спасательных и обзорно-поисковых работ;
- организация гидроакустической связи с подводными лодками и другими подводными техническими средствами.

В ходе реализации программы «*Biomimetic Underwater*

Robot» были разработаны макетные образцы миниатюрных подводных роботов «Робот-лобстер – *Lobster Robot*» и «Робот-минога – *Undulatory Robot*» (рис. 17). Данные проекты осуществляются при финансовой поддержке Управления перспективных исследований и разработок Министерства обороны США – DARPA (Отдел оборонных наук – DSO) и Отдела научных исследований ВМС США – *Office Naval Research* – ONR [21].

В другой научно-исследовательской организации США – лаборатории Дрейпера (*Draper Laboratory*) – интенсивно ведутся исследования по созданию необитаемых подводных аппаратов повышенной маневренности. Предполагается, что на основе технической имитации технологий движения рыб будут созда-



Рис. 17. Внешний вид автономных подводных роботов, разработанных в ходе реализации научно-исследовательских программ США



Рис. 18. Внешний вид АПМА МТ1

ны подводные аппараты, обладающие малым радиусом разворота, существенно сокращенным временем разгона и торможения [20]. Внешний вид одного из действующих макетных образцов такого подводного робота-рыбы показан на рис. 17. Робот-рыба имеет массу ~ 130–150 кг, длину ~2,4 м и может развивать скорость до 5 км/ч. В ходе многочисленных испытаний в закрытом бассейне Нью-Гемпширского университета и в открытых акваториях была отработана гибкая конструкция корпуса подводного робота, а также уточ-

нены алгоритмы управления его движением.

В Массачусетском технологическом институте (*Massachusetts Institute of Technology – MIT*) создан подводный робот «Щука – Pike» длиной ~ 0,7...0,8 м, способный развивать скорость до 5...6 м/с. Данный робот является следующим этапом развития экспериментального подводного робота «Tuna», разработанного в этом же институте еще в 1994 г.

Другим примером АПМА бионического типа является робот-рыба МТ1 (рис. 18), со-

зданный в *Essex University* (Великобритания).

Микроаппарат МТ1 имеет массу в воздухе ~ 3,55 кг при длине 48 см (включая хвостовой плавник длиной 12 см), ширине 21,5 см (включая два грудных плавника длиной по 8 см каждый) и высоте 15 см.

В базовую конструкцию робота МТ1, обладающего нейтральной плавучестью, входят (рис. 19):

- прочный корпус, внутри которого размещены электронные устройства (блок управления, процессор, навигационные датчики, блок беспроводной связи



Рис. 19. Основные элементы конструкции АПМА МТ1

и устройство хранения информации);

- движительно-рулевой комплекс, включающий два микроэлектродвигателя (основной – для управления хвостовым плавником и вспомогательный – для управления грудными плавниками), блок управления двигателями, приводы (гибкие пластиковые пластины, металлические валы и рычаги) и три плавника (один хвостовой и два грудных);
- элементы плавучести;
- система энергообеспечения на основе элементов питания типа АА;
- навигационный комплекс, состоящий из датчика глубины (использован датчик давления 40PC015 производства компании «Honeywell»), инклинометра (на базе акселерометра ADXL202, производства компании «Analog Devices»), датчика курса (используется электронный компас CMPS03 производства *TotalRobots*);
- система технического зрения (обнаружения препятствий), созданная на основе 2-х ИК-датчиков производства *TotalRobots*;
- беспроводной модем стандарта Wi-Fi (IEEE 802.11g) и антенна.

Для установки / смены программного задания и получения данных от датчиков АПМА используется портативный компьютер с модулем беспроводной связи.

МТ1 способен самостоятельно ориентироваться и передвигаться в подводном пространстве на глубине до 10 м, имитируя при этом способы движения различных видов рыб. При отработке алгоритмов движения микроаппарата широко использовались технологии искусственного интеллекта и нейросетевые методы самообучения.

В заключение можно сделать следующие выводы, характеризующие состояние и основ-

ные тенденции развития подводных микроаппаратов и микророботов:

1. Подводные микроаппараты и микророботы – это новый класс изделий микросистемной техники, сформировавшийся в результате глобальной миниатюризации всех систем необитаемых подводных аппаратов;

2. Наибольшая активность исследований и разработок (по числу патентов и публикаций в научно-технической литературе), посвященных проблемам создания ПМА, наблюдается в США, Японии, Сингапуре, Канаде и Исландии. Мировым лидером в разработке ПМА являются США (особенно в классе автономных ПМА);

3. Большинство из коммерчески доступных подводных микроаппаратов и микророботов относится к классу неавтономных НПА. Мировыми лидерами по объему продаж таких аппаратов стали компании «VideoRay» (США) и «Inuktun» (Канада);

4. В настоящее время в эксплуатации находится незначительное число типов автономных ПМА. Преимущественно это разработки компаний «Nekton Research» LLC (США), «iRobot Corp» (США) и «Inuktun» (Канада);

5. Большинство существующих проектов АПМА относится к экспериментальным разработкам, ориентированным на долгосрочную перспективу. Этот факт связан с тем, что, с одной стороны, при уменьшении массы и размеров аппарата использование в нем существующей (серийно разработанной) аппаратуры часто затруднено неприемлемостью ее массогабаритных характеристик, с другой – при существенном сокращении массогабаритных характеристик НПА необходимо создание новых подходов к их

проектированию. Устранение первой причины в наибольшей степени связано с использованием и дальнейшим развитием технологий микросистемной техники. Вторая причина требует концентрации научных исследований на решении задач миниатюризации и удешевления конструкций НПА;

6. Приоритетной областью исследований и разработок по созданию АПМА является бионика. В рамках этой области сконцентрировано наибольшее число работ, финансируемых Министерством обороны США;

7. Можно предположить, что массовое производство АНПА класса «микро» начнется не ранее 2008–2010 гг. При этом первоначально будут создаваться микроаппараты одноразового применения (невозвращаемые) стоимостью менее 500–1000 дол. США.

8. Основными объектами исследований и разработок при создании АПМА являются системы энергообеспечения; движительно-рулевые комплексы; конструкции ПМА на бионических принципах; миниатюрные системы управления движением; бортовые автономные системы навигации в миниатюрном исполнении; комплексированные системы технического зрения; миниатюрные датчики и различные преобразователи сигналов.

ПРИМЕЧАНИЕ РЕДАКТОРА

Интенсивное развитие ПМА за рубежом ориентировано преимущественно на решение специальных задач коммерческого и военного назначения. Выполнение более сложных глубоководных работ при наличии принципиальных физических ограничений остается пока «привилегией» традиционных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В., Молоков Ю.Г., Никифоров В.В., Рылов Н.И. Автоматические подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1981. С. 223.
2. Боженов Ю.А., Гаврилов В.М., Жуков Ю.И., Иконников И.Б. и др. Самоходные необитаемые подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1986.
3. Ракигин И.Я. Подводные робототехнические системы. М.: НИИП "Море", 2002. 191 с.
4. Ястребов В.С., Игнатьев М.Б., Кулаков Ф.М., Михайлов В.В. Подводные роботы. Л.: Судостроение, 1977. С. 363.
5. Необитаемые подводные аппараты военного назначения / под ред. М.Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2005. 164 с.
6. Molchan M. The Role of Micro-ROVs // Maritime Safety and Security, Molchan Marine Sciences, 2005. P. 44.
7. Бочаров Л.Ю. Анализ тенденций развития исследований и разработок в области создания подводных микроаппаратов // Микросистемная техника. 2005. № 3. С. 32–39.
8. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations, Committee on Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations // National Research Council, National Academies Press, 2005. P. 256.
9. Roles of Unmanned Vehicles, Naval Research Advisory Committee Report, NRAC 03-1, 2003. P. 56.
10. Undersea Vehicles and National Needs. Marine Board Commission on Engineering and Technical Systems // National Research Council, National Academy Press. 1996. 2000. P. 112.
11. Unmanned Vehicles in Mine Countermeasures, Naval Research Advisory Committee, Washington, D.C. 1999.
12. Автономные необитаемые подводные аппараты / под общ. ред. М.Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 272.
13. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др. / под общ. ред. М.Д. Агеева; Институт проблем морских технологий. М.: Наука, 2005. С. 398.
14. The US Navy Unmanned Undersea Vehicle Master Plan, Department Navy, 2004. P. 80.
15. Marine Technology Reporter, September 2005, P. 68.
16. Jindong Liu, Ian Dukes, Huosheng Hu. Novel Mechatronics Design for a Robotic Fish // 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. P. 2077–2082.
17. J.Z. Yu, M. Tan, S. Wang, E. Chen, Development of a Biomimetic Robotic Fish and its Control Algorithm, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – V. 34, Pt B, N 4, August 2004. P. 1798–1810.
18. Basic Research Plan, Department of Defense, Director of Defense Research and Engineering, February 2003.
19. Webb B, Consi TR, Biorobotics: Methods & Applications. Menlo Park, CA: AAAI Press., 2001. P. 134.
20. Бочаров Л.Ю., Эпинатьев И.Д. Состояние и перспективы развития подводных мини- и микроробототехнических систем за рубежом // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 39.
21. Kirchner F. Development of Terrestrial Ambulatory Autonomous Robots // Proc 2nd DARPA-CBS Workshop on controlled biological systems, Tuscon, Arizona, USA, January 1999.
22. Walsh, D. Undersea satellites: The commercialization of AUVs. Marine Technology Society Journal 27(4). 1994. P. 54–63.

