

УДК 629.58:553.98

Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов

А.М. Маевский^{1,2*}, Б.А. Гайкович¹

¹ АО «НПП ПТ «Океанос», Российская Федерация, 194295, г. Санкт-Петербург, б-р Поэтический, д. 2, литер А, пом. 1384

² Южный федеральный университет, Российская Федерация, 344006, Ростовская обл., г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42

* E-mail: office@oceanos.ru

Тезисы. Характерной особенностью последних десяти лет являются высокие темпы поиска и разработки подводных углеводородных месторождений. Ввиду высокой стоимости проведения подобного рода работ уместно использование автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА).

В статье авторами описывается процесс разработки принципиально нового подводного аппарата, объединяющего в себе основные преимущества традиционных АНПА, подводных глайдеров и телеуправляемых подводных аппаратов, оснащенных манипуляторным комплексом. Рассматриваются этапы реализации проекта, и демонстрируются полученные результаты натурных испытаний.

По совокупному нефтегазовому потенциалу осадочные бассейны российского арктического шельфа сравнимы с крупнейшими нефтегазоносными регионами мира. По оценкам специалистов компании «Роснефть», к 2050 г. арктический шельф будет обеспечивать от 20 до 30 % всей российской нефтедобычи и на его освоение потребуются около 2,5 трлн долл. США [1].

По мнению специалистов, в настоящее время в лучшем случае только одна из трех-четырех пробуренных поисковых скважин на шельфе является продуктивной, а среднестатистическое количество продуктивных скважин для шельфа, к примеру, Вьетнама за 30 лет составило всего 15 % [2–4]. Это наиболее критично при бурении разведочных скважин в глубоководных морских акваториях. Например, средние затраты в сутки на глубоководное бурение в Мексиканском заливе в 2008 г. составляли 600 тыс. дол. США, в то время как для мелководного (до 200 м) бурения на шельфе Вьетнама – 450 тыс. дол. США [5]. Таким образом, нетрудно оценить финансово-временные потери, которые несут нефтегазовые компании из-за недостоверных или ошибочных прогнозов, основанных на применении стандартных методов геофизической разведки. Поэтому снижение рисков бурения пустых скважин становится особенно актуальным в условиях глобального финансово-экономического кризиса.

На текущий момент основным методом поиска углеводородных месторождений является сейсмическая разведка. Это геофизический метод определения геологического строения среды путем изучения ее акустических свойств посредством фиксации картины распространения упругих волн.

Сегодня все исследования такого рода выполняются с помощью сейсмопушек – импульсных невзрывных источников, возбуждающих колебания в широкой полосе частот (так называемые 3D-сейсмоисследования). Как известно, основным необходимым оборудованием для сейсмических исследований являются пневмоизлучатели и сейсмокосы (ССК), которые буксируются за научно-исследовательским судном вдоль линии исследуемого профиля (рис. 1). В глубоководных районах судно движется с постоянной скоростью, излучая и принимая сигналы. В мелководных районах ССК буксируются над дном в режиме с остановками (старт-стопный режим) для уменьшения влияния низкочастотных подводных акустических и гидродинамических

Ключевые слова:

поиск углеводородов, глайдер, автономный необитаемый подводный аппарат, манипулятор, морская робототехника, подводный робот.

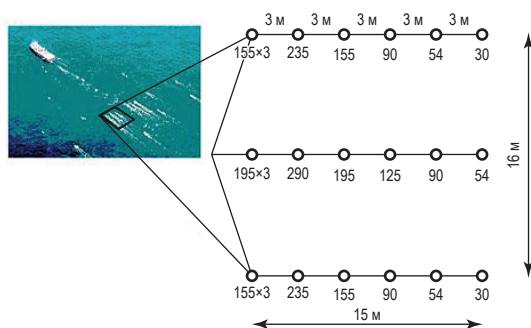


Рис. 1. Массив пневматических источников импульса, буксируемый за судном сейсморазведки

помех. При этом основными недостатками двух- и трехмерной (3D / 4D) сейсморазведки являются:

- использование косвенной информации, причем даже не в поле отраженных акустических волн – наиболее информативных, а в поле преломленных волн;
- малая производительность из-за низкой скорости (2...3 узла) буксировки ССК;
- низкая достоверность из-за трудностей интерпретации полученных в нелинейных средах (морская вода, слой осадков и т.д.) результатов и др.;
- сложность проведения морских работ в Арктическом регионе из-за возможной тяжелой ледовой, климатической и штормовой обстановки;
- высокая стоимость обслуживания и оснащения специализированного судна.

Также в последние годы наряду с буксируемыми ССК стали шире применять донные системы ССК, а также автономные донные сейсмические станции, которые могут быть сопряжены в единый комплекс с другими геофизическими исследовательскими системами.

В качестве альтернативной и более экономичной технологии исследования труднодоступных для традиционных судов районов возможно использовать автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). Целесообразность этого подтверждается рядом проектов различных компаний и научно-исследовательских институтов.

Примеры использования различных типов АНПА в целях поиска углеводородов

Проект WiMust предусматривал использование группы (так называемой «стаи») гибридных

АНПА, способной в зависимости от внешних условий выполнять перестроение формации¹ [6]. В эксперименте участвовали АНПА марки Folaga, конфигурация которых позволяет совместно воплотить традиционные (при помощи пропульсивных комплексов «двигатель – движитель») и гидродинамические (горизонтальное перемещение подводного планера на основе знакопеременной плавучести и изменяемого центра масс) принципы движения. АНПА гибридного типа могут перемещаться в исследуемом районе в энергосберегающем режиме глайдера (планировать), а движитель использовать только при необходимости перестроения или удержания формации.

АНПА глайдерного типа активно применяются при глубоководных разведочных и исследовательских работах. К примеру, нефтегазодобывающий гигант Total и разработчик глайдеров Alseamar использовали подводный глайдер SEAEXPLORER² для поиска углеводородов на глубине до 1000 м методом физико-химического анализа.

Также крупнейшим коммерческим флотом глайдеров Slocum производства Teledyne Webb располагает фирма BlueOcean. Рабочая глубина погружения аппаратов составляет 1000 м, автономность – 3...6 мес. В 2017 г. в ходе проекта Davaria с рабочими глубинами до 200 м глайдеры искали и обнаружили шлейфы углеводородов в районе Папуа – Новая Гвинея и побережья Австралии.

Как правило, на такие устройства устанавливается следующая исследовательская аппаратура:

- датчик метана, имеющий высокую скорость реакции срабатывания (до нескольких секунд) и устойчивость в работе в широком диапазоне температур и концентраций измеряемого газа;
- высокоточный флуоресцентный сенсор полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) с порогом чувствительности до 0,1 мкг/л для фенантрена;
- различные анализаторы нефтепродуктов и т.д.

¹ Формация – термин из области парашютного спорта; означает фигуру, построенную большим количеством парашютистов в свободном падении или под куполами.

² См. <https://www.alseamar-alcen.com/products/underwater-glider/seaexplorer>.

Анализ показывает актуальность использования подводных глайдеров как носителей исследовательской аппаратуры, которые могут в течение нескольких месяцев выполнять поставленную задачу. Подводные глайдеры позволяют безопасно и экономически эффективно проводить исследования в прежде недостижимых зонах Мирового океана. Рабочая глубина погружения таких устройств может достигать 10 км [7].

Актуальность применения морских робототехнических комплексов для сейсморазведки в подледных акваториях

По данным Геологической службы США, к 2007 г. на российско-канадской материковой части Арктики были открыты более 400 нефтегазовых месторождений, содержащих порядка 10 % мировых доказанных запасов углеводородов [8]. Разработка морских нефтегазовых ресурсов Арктики, представляющей собой одну из последних неразведанных углеводородных «кладовых» мира, связана со значительными финансовыми затратами. Согласно оценкам Международного энергетического агентства [9], добыча конвенциональной нефти обходится не более чем в 40 долл. США за баррель, а издержки на добычу барреля нефти в Северном Ледовитом океане могут составлять от 30 до 100 долл. США. Подобная ситуация наблюдается и на газовом рынке: если издержки добычи конвенционального газа не превышают 6 долл. на млн БТЕ³ (около 200 долл. на 1000 м³), то добыча в Северном Ледовитом океане и на глубоководных месторождениях может обходиться в 4...12 долл. на млн БТЕ (140...420 долл. на 1000 м³).

В соответствии с Основами государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу, утвержденных указом президента РФ в сентябре 2008 г., одной из главных задач государственной политики России в Арктике является превращение Арктической зоны Российской Федерации к 2020 г. в ведущую стратегическую ресурсную базу России (в первую очередь речь идет об углеводородных ресурсах), «обеспечивающую решение задач социально-экономического развития страны».

На Россию приходится около четверти всех шельфовых запасов углеводородного сырья в мире, включая 40 из 60 крупных арктических месторождений [10]. По оценкам Российской академии наук, на которые сослался президент России Владимир Путин, в Арктической зоне сосредоточена подавляющая доля общероссийских и общемировых запасов полезных ископаемых, %: золота – 40, нефти – 60, газа – от 60 до 90 [11]. Из всех приарктических государств Россия первой приступила к освоению морских углеводородных ресурсов Арктики в покрытых льдом районах.

В свете перечисленного особое значение приобретает развитие морских робототехнических комплексов, способных в течение долгого времени проводить глубоководные исследования в условиях недетерминированных (неопределенных) сред с препятствиями. На сегодняшний день такие аппараты обладают следующими преимуществами:

- минимальной зависимостью от наземного пункта управления или судна обеспечения;
- максимальной энергоэффективностью применительно к выполнению большего количества задач;
- возможностью полного автономного подводного (подледного) движения с учетом изменяемых ледовой и морской обстановки, в том числе наличия динамически изменяемой среды (возникновения возмущений в виде течений и т.д.).

Предлагается распределенная система проведения сейсмообследований (рис. 2), включающая:

1) универсальную гибридную платформу-носитель, передвигающуюся в подводном и надводном режимах и имеющую достаточные энергозапас и габариты для работы в качестве источника питания, носителя и командно-навигационного ядра группы менее габаритных АНПА, выполняющих функции сейсμοприемников;

2) малогабаритные АНПА-носители сейсμοприемников с возможностью группового управления (в частности может быть использован подход на основе неустойчивых режимов управления, который обеспечивает достаточную устойчивость работы робототехнического комплекса в условиях недетерминированных сред с препятствиями) [12, 13];

3) подводные автономные аппараты комбинированного типа для пробоотбора

³ БТЕ (англ. British thermal unit, BTU) – британская тепловая единица.



Рис. 2. Буксировка антенн 3D Sensor Array компании Schlumberger волновым глайдером:
а – конфигурация системы; б – фазированная антенная решетка

грунта и воды, также функционирующие в качестве донных станций наблюдения (или обеспечивающие разворачивание и сбор таких станций).

Разработка АО «НПП ПТ «Океанос» АНПА типа «глайдер»

По данным на октябрь 2018 г., разработкой подводных глайдеров в России занимаются несколько организаций и исследовательских институтов [14]. АО «НПП ПТ «Океанос» совместно с СПбГМТУ с 2011 г. в инициативном порядке разрабатывают АНПА планерного и гибридного типов. Групповое взаимодействие между разнородными аппаратами и резидентным необитаемым подводным аппаратом (РНПА), который служит носителем элементов группы, представлено на рис. 3. За это время были выполнены эксперименты и натурные испытания ходового стенда глайдера (табл. 1) как на внутренних акваториях в спокойной воде, так и в открытом море.

Процесс разработки гибридного подводного аппарата подразумевает множество этапов,

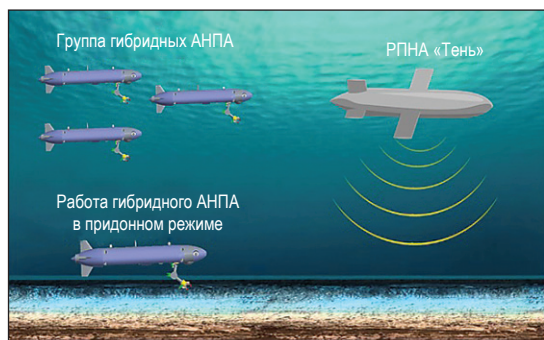


Рис. 3. Схема функциональных элементов предлагаемой концепции

связанных с построением математической модели объекта, его системы управления и программного обеспечения. Стандартная математическая модель подводного глайдера [15, 16] может быть представлена в виде следующих уравнений:

$$\begin{cases} \dot{Y} = \sum(\theta, x) = \begin{pmatrix} \sum_p(\theta, x) \\ \sum_0(\theta, x) \end{pmatrix}; \\ \dot{x} = M^{-1}F; \\ \dot{r}_p = \frac{1}{m_p}P_p - V - W r_p; \\ \dot{P}_p = \bar{u}; \\ \dot{m}_b = u_b, \end{cases} \quad (1)$$

где x – m -вектор внутренних координат; \dot{Y} – n -вектор положения и ориентации связанной системы координат относительно базовой, $n \leq 6$; $\sum(\theta, x)$ – n -вектор кинематических связей; $\sum_p(\theta, x)$ – вектор линейных скоростей связанной системы координат относительно базовой; $\sum_0(\theta, x)$ – вектор угловых скоростей связанной системы координат относительно базовой; M^{-1} – матрица массо-инерционных параметров глайдера, также включающая в себя присоединенные массы АНПА и моменты инерции; $F(x, Y, r_p, P_p, u, l, R)$ – m -вектор внешних и внутренних сил и моментов [здесь l – вектор конструктивных параметров; R – вектор гидродинамических сил и моментов; u – $(m-1)$ -вектор управляющих воздействий (внутренние силы, воздействующие на подвижную массу); r_p – вектор положения подвижного

затянутого аппарата относительно базовой; M^{-1} – матрица массо-инерционных параметров глайдера, также включающая в себя присоединенные массы АНПА и моменты инерции; $F(x, Y, r_p, P_p, u, l, R)$ – m -вектор внешних и внутренних сил и моментов [здесь l – вектор конструктивных параметров; R – вектор гидродинамических сил и моментов; u – $(m-1)$ -вектор управляющих воздействий (внутренние силы, воздействующие на подвижную массу); r_p – вектор положения подвижного

груза; P_p – вектор импульса подвижной массы; Y – m -вектор внешних моментов, действующих на глайдер]; $\vec{u} = P_p \times W + F_p + u$ [здесь W – вектор угловых скоростей глайдера; F_p – вектор силы тяжести, действующий на подвижную массу в связанной системе координат]; m_p – изменяющаяся масса глайдера (масса балласта); V – скорость движения глайдера; u_b – управляющее воздействие, строящееся на выходе из системы управления.

Поскольку глайдеру необходимо производить процесс поиска залежей углеводородов в пределах определенной акватории, важным фактором является отработка движения по заданным траекториям. Меандр теоретически обеспечивает наиболее оптимальное покрытие исследуемой территории, поскольку не содержит повторных покрытий и возвратных движений. Траектория движения в виде циклоиды используется для поиска точечных объектов, размеры которых сопоставимы с размерами АНПА и радиусом его циркуляции. Чаще всего координаты таких объектов выявляются в ходе площадных съемок. Повторные перекрытия и возвратные движения служат для более точного определения координат искомого объекта. Если есть необходимость обследовать подводные коммуникации, применяется зигзагообразная траектория. Галсы располагаются под углом к направлению объекта (кабеля или трубопровода). Примеры типовых элементов поисково-обследовательских схем представлены на рис. 4. Пример отработки данных траекторий в комплексе математического моделирования приведен на рис. 5.

Как показали математические исследования и натурные испытания, глайдер является довольно сложной инертной системой, в виду чего аппарат не способен выполнять резкие повороты и другие маневры, доступные традиционным АНПА, оснащенным двигателями. Это существенно сказывается на маневренности аппарата, но в то же время обеспечивает более энергоэкономичный режим движения.

Собственное программное обеспечение (ПО) созданного глайдера позволяет (рис. 6):

- задавать режимы работы аппарата;
- собирать всю информацию и телеметрию, получаемую АНПА;
- анализировать результаты работы с учетом трехмерной визуализации данных.

Созданная архитектура системы автоматического управления роботом полностью

Таблица 1
Основные характеристики созданного АНПА
типа «глайдер»

Тип корпуса	Торпедообразный (цилиндрический) с оконечностями в виде тел вращения
Длина корпуса (без антенны), мм	2720
Диаметр корпуса, мм	320
Удлинение корпуса, мм	8,5
Размах крыльев, мм	1680
Удлинение крыла, мм	5
Форма крыла в плане	Прямоугольная
Кормовые стабилизаторы	Схема «крест»
Управляемые гидродинамические поверхности	Вертикальный руль
Объем носового модуля изменения плавучести (МИП), л	1,8
Объем кормового МИП, л	3,1 (используется в режиме связи)
Система точной дифферентовки и изменения угла крена	Продольное и радиальное смещение батарейного блока
Масса, кг	132
Горизонтальная скорость, м/с	0,38
Масса полезной нагрузки, кг	≤ 26
Глубина погружения, м	≤ 1000 (при замене материала корпуса с сохранением размеров)
Тип аккумуляторной батареи	Литий-ионная
Емкость, А·ч	40

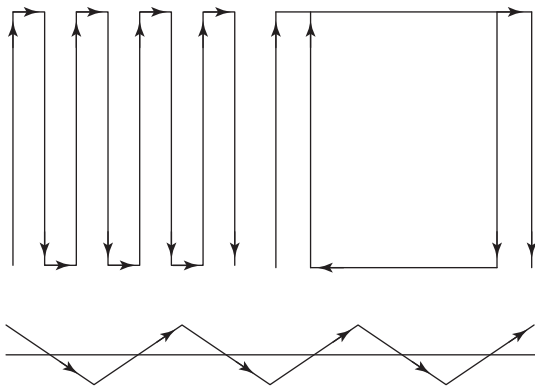


Рис. 4. Типовые элементы покрытия акватории

отрабатывает поставленные задачи при проведении практических спусков.

Следующим этапом разработки является создание гибридного интервенционного АНПА (рис. 7, 8, табл. 2), несущего на борту электрический манипуляторный комплекс, который уже был разработан ранее и прошел опытные испытания (рис. 9). Интеграция манипулятора существенно расширяет спектр выполняемых

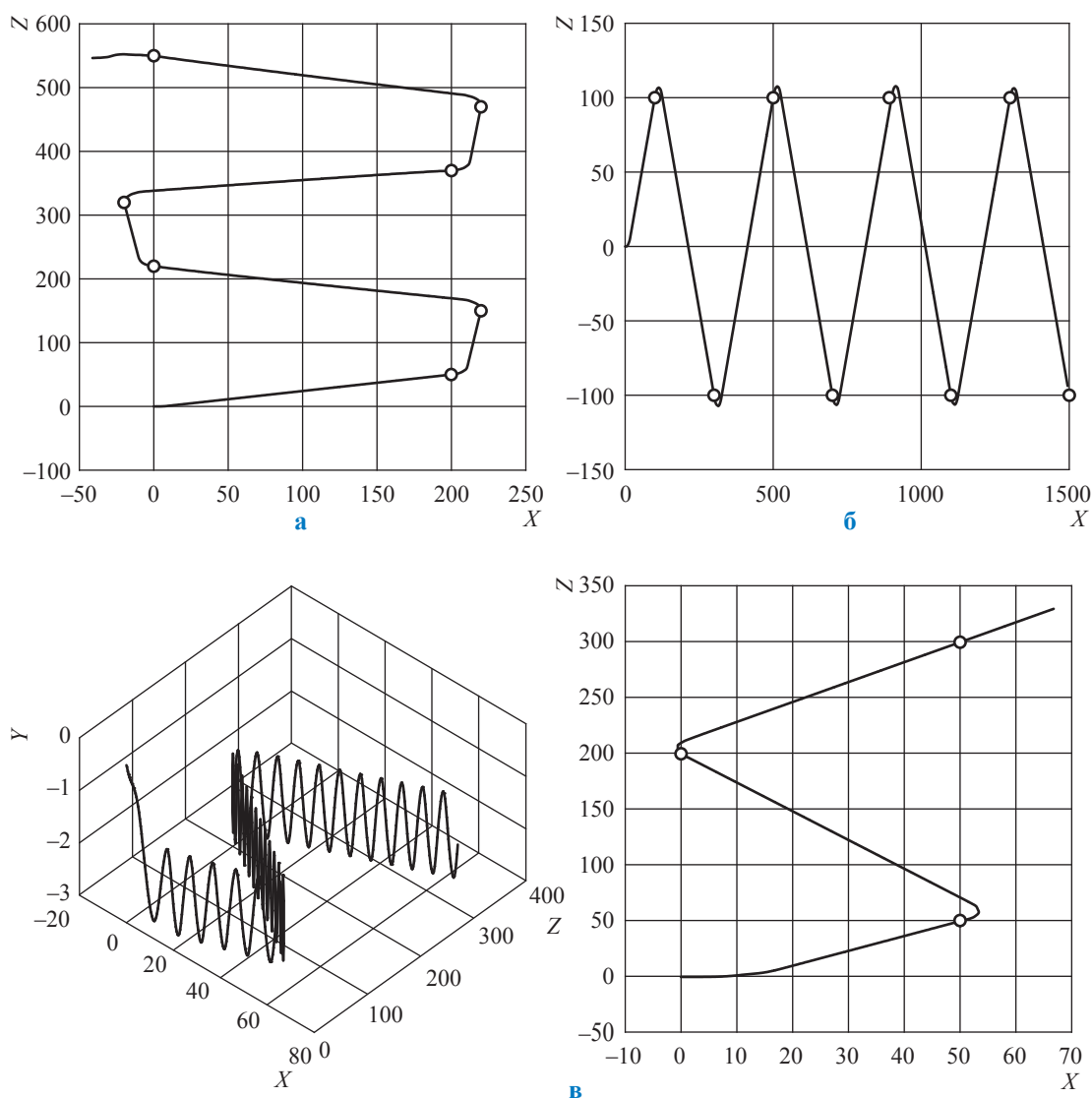


Рис. 5. Примеры движения глайдера: а – по меандру; б – по зигзагообразной траектории; в – по заданным точкам с координатами (50; 50), (0; 200), (50; 300)

задач и позволяет осуществлять не только сейсмический и физико-химический мониторинг, но и отбор проб грунта, подъем необходимых объектов со дна акватории и иные работы.

Натурные испытания проводились в дистанционном режиме управления в исследовательском бассейне СПбГМТУ глубиной 3 м. На базе существующей программной платформы создано рабочее место оператора в составе: выносного пульта управления с джойстиком манипуляторного комплекса и АНПА; графического интерфейса оператора (рис. 10), при помощи которого на борт управления устройством могут быть отправлены необходимые команды (к примеру, «включить систему автоматической стабилизации по глубине и систему автоматического удержания дифферента

аппарата»), и наоборот, оператору переданы необходимые данные, например, нагрузка на двигатель аппарата, текущие значения основных параметров (глубины, углов ориентации и т.д.), интерактивная трехмерная модель, дающая представление о расположении основных звеньев манипуляторного комплекса.

К основным задачам испытаний относились оценка характеристик системы управления гибридным АНПА и манипулятором в комбинированном режиме и отработка системы стабилизации аппарата с целью обеспечения возможности удержания глубины и пространственного положения при работе манипулятора. Результаты работы систем стабилизации по углу дифферента и глубине в режиме продольно-поперечного маневрирования

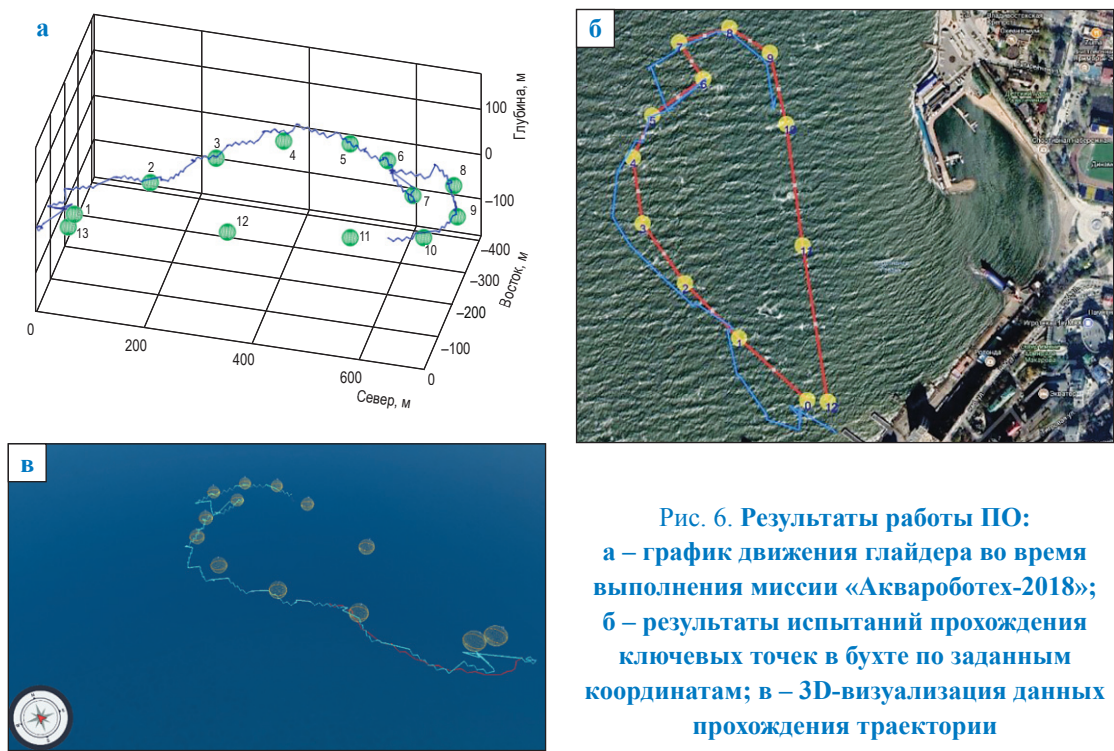


Рис. 6. Результаты работы ПО:
а – график движения глайдера во время выполнения миссии «Аквароботех-2018»;
б – результаты испытаний прохождения ключевых точек в бухте по заданным координатам; в – 3D-визуализация данных прохождения траектории

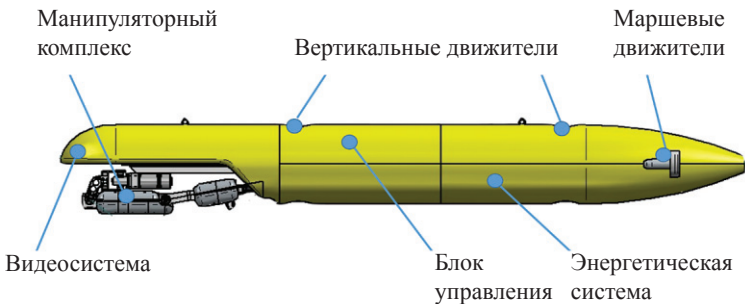


Рис. 7. Схема расположения модулей гибридного интервенционного АНПА

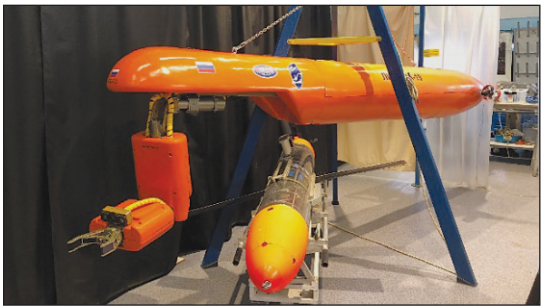


Рис. 8. Демонстратор технологий гибридного интервенционного АНПА и классический глайдер (подводный планер) на опытном производстве АО «НПП ПТ «Океанос»

Таблица 2

Характеристики легкого интервенционного АНПА

Количество стационарных движителей	4
Количество съемно-регулируемых движителей	4
Масса аппарата, кг	180
Габариты аппарата, м	4,5×0,5
Максимальный вылет манипулятора, м	1,2
Скорость хода, узлов	≤ 4
Силовой параметр манипуляций на полном вылете, Н	≤ 200



Рис. 9. Подводный электрический манипуляторный комплекс, совместно разработанный СПбГМТУ и АО «НПП ПТ «Океанос»

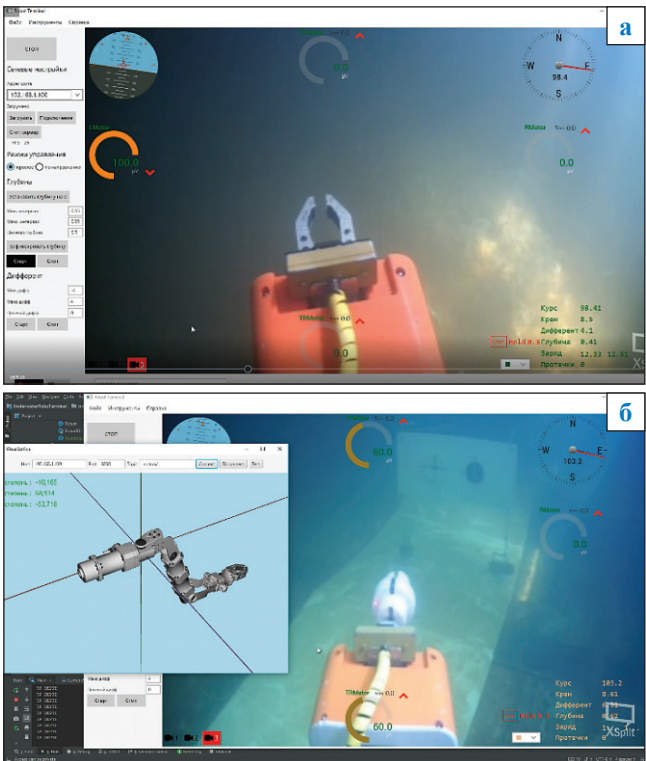


Рис. 10. Интерфейс оператора: а – экран пункта управления и данные телеметрии; б – 3D-изображение рабочего органа в реальном времени

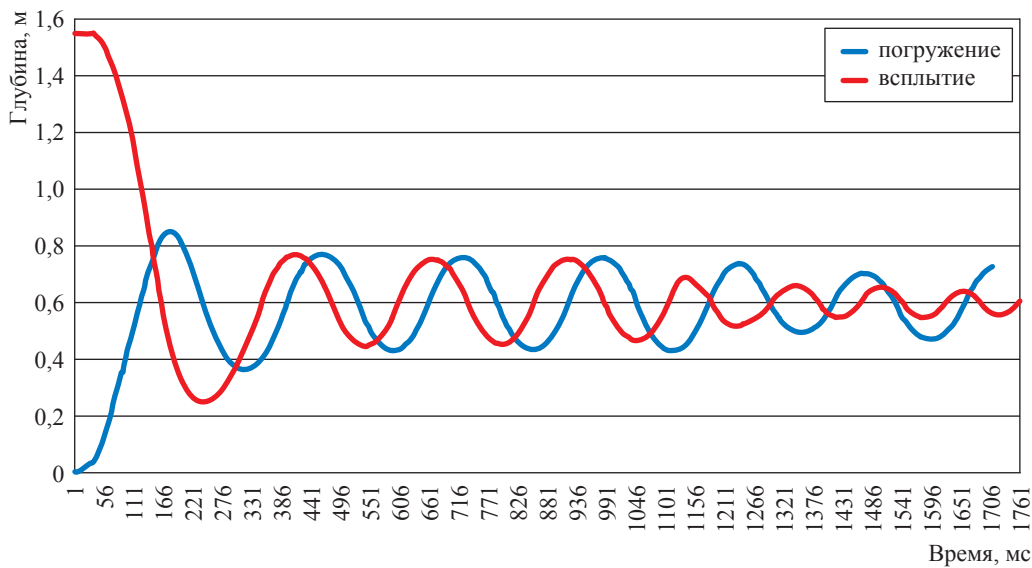


Рис. 11. Данные системы стабилизации глубины АНПА при режимах всплытия/погружения (без работы манипулятором)

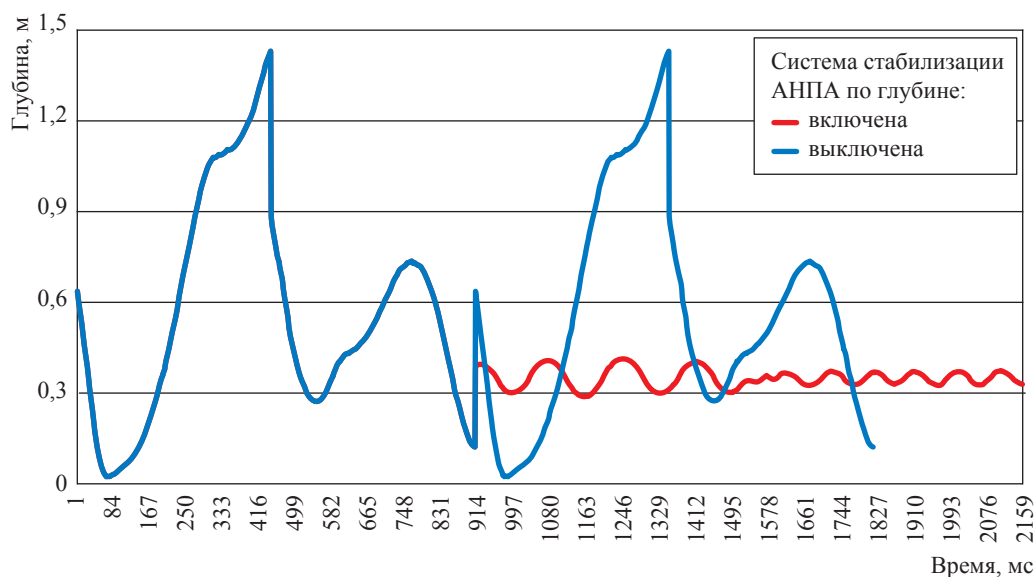


Рис. 12. Траектория движения АНПА во время активной работы манипуляторного комплекса

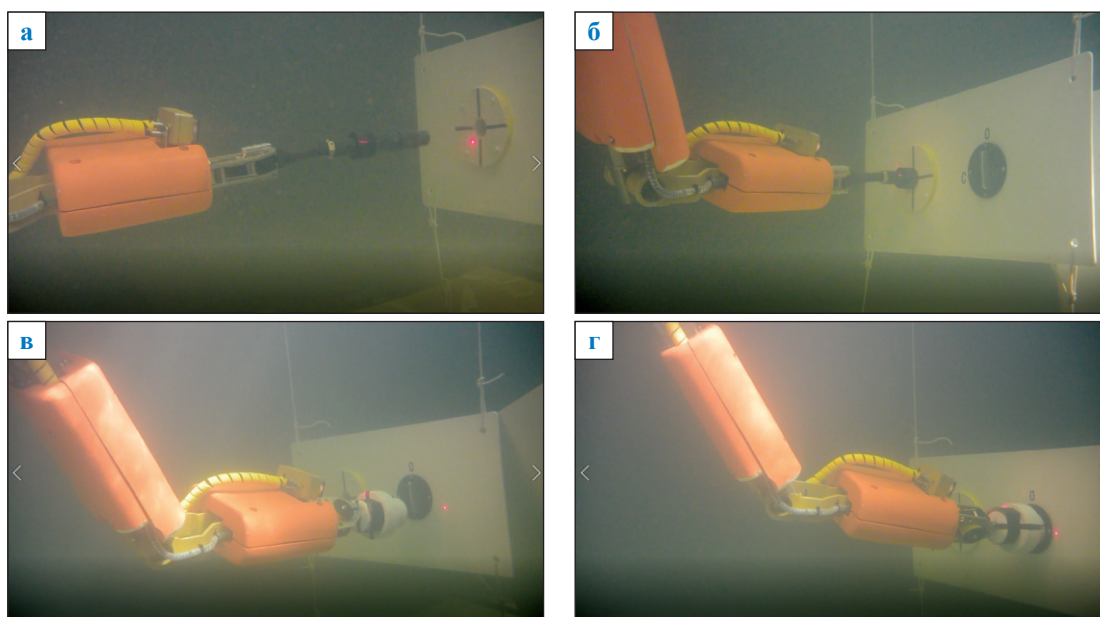


Рис. 13. Демонстрация успешно выполненной миссии: а, б – работа с быстроразъемным гидравлическим элементом типа Hot Stub и его интеграция в технологическое отверстие; в, г – поворот клапана подводным динамометрическим инструментом

аппарата и при активном манипуляторе в пределах отклонения его звеньев $\pm 30^\circ$ представлены на рис. 11 и 12.

Проведенные испытания показали следующее:

- система управления глайдером способна реализовывать движение аппарата по заданным точкам в натурных условиях открытой акватории;
- демонстратор технологий гибридного интервенционного АНПА обеспечивает достаточную для работы манипуляторного комплекса стабилизацию аппарата в заданном коридоре (например, $\pm 0,2$ м, см. рис. 12);
- разработанное ПО дает возможность полноценно управлять гибридным интервенционным АНПА и его исполнительными органами в дистанционном режиме (рис. 13);

- рабочее место оператора предоставляет полную информацию о состоянии аппарата, интегрированная система технического зрения и синхронизированная 3D-модель манипулятора транслируют данные об окружающей обстановке и расположении его рабочих органов;

- данные логов⁴ демонстрируют адекватную работу разработанных систем.

В дальнейшем планируется продолжить работы по интеграции и синтезу адаптивной автономной системы управления АНПА и манипуляторным комплексом, способной обеспечить самостоятельное движение аппарата и работу манипулятора в условиях неопределенности, а также интеграции оптической системы связи для обеспечения подводной коммуникации с АНПА минуя стандартные гидроакустические каналы связи.

Можно отметить, что в результате работ создан и успешно испытан первый отечественный образец гибридного АНПА, способного обеспечить полноценную работу манипуляторного комплекса, в том числе со значительным объемом стандартной номенклатуры инструментария рабочих телеуправляемых подводных аппаратов согласно ISO 13628-8 (API 17D). Система управления АНПА предоставляет возможность организовать движение аппарата по необходимым траекториям. АНПА имеет достаточно места для установки дополнительного оборудования, такого как датчики метана, высокоточный флуоресцентный сенсор, различные анализаторы и пр. Результаты испытаний подтверждают применимость гибридного АНПА в крайне неблагоприятных условиях (на сверхмалых глубинах, при наличии ограничений по маневровой зоне и т.д.).

Список литературы

1. Шельфовые проекты // Роснефть [электрон. ресурс]. – <https://www.rosneft.ru/business/Upstream/offshore/> (дата обращения: 14.04.19).
2. Бахарев С.А. К вопросу концепции построения подводного многофункционального судна / С.А. Бахарев // Геофизический вестник. – 2010. – № 8. – С. 9–12.
3. Бахарев С.А. Использование широкополосных приемных акустических антенн в морской геофизике / С.А. Бахарев, Е.В. Завалко, А.В. Рогожников // Геофизика. – 2010. – № 1. – С. 45–51.
4. Бахарев С.А. Использование широкополосных излучающих акустических антенн в морской геофизике для исследования структуры дна / С.А. Бахарев, Е.В. Завалко, А.В. Рогожников // Геофизика. – 2010. – № 6. – С. 33–38.
5. Бахарев С.А. Подводно-подледный поиск месторождений углеводородов в северных и арктических акваториях / С.А. Бахарев, В.Б. Казаков // Вестник РАН. – 2017. – № 2. – С. 47–55.
6. Al-Khatib H. The widely scalable mobile underwater sonar technology (WiMUST) project: an overview / H. Al-Khatib, G. Antonelli, A. Caffaz etc. // Proceedings of MTS/IEEE Oceans'15. – Genova, Italy, 2015. – С. 1–5.
7. Circum-Arctic resource appraisal: Estimates of undiscovered oil and gas north of the Arctic Circle / U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey. – U.S. Geological Survey, 2008. – Fact Sheet 2008-3049. – <https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/fs2008-3049.pdf>
8. Gautier D.L. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic / D.L. Gautier, K. Bird, R.R. Charpentier et al. // Science. – 2009. – Т. 324. – № 5931. – С. 1175–1179.
9. Arctic oil and gas in the global energy picture by International Energy Agency. – 2010.
10. Более 40 крупных месторождений углеводородов в Арктике в российском секторе ждут добычи // neftegaz.ru [электрон. ресурс]. – <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/240207-bolee-40-krupnykh-mestorozhdeniy-uglevodorodov-v-arktike-v-rossiyskom-sektore-zhdut-dobychi/> (дата обращения: 14.04.19).
11. Раксина А. Власти готовы пустить частные компании на арктический шельф. Но пойдут ли они туда? / А. Раксина // ТАСС [электрон. ресурс]. – <https://tass.ru/ekonomika/6319060> (дата обращения: 14.04.19).
12. Pshikhov V. Decentralized control of a group of homogeneous vehicles in obstructed environment / V. Pshikhov, M. Medvedev, A. Kolesnikov et al. // Journal of Control Science and Engineering. – 2016. – Article ID 7192371.
13. Пшихопов В.Х. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов / В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев // Труды СПИИРАН. – 2018. – № 5 (60). – С. 39–63. – <https://doi.org/10.15622/sp.60.2>

⁴ Лог – автоматически создаваемый хронологический протокол работы программы или устройства.

14. Применение подводных глайдеров для геологоразведки // RoboTrends [электрон. ресурс]. – <http://robotrends.ru/pub/1837/primenenie-podvodnyh-glyayderov-dlya-geologorazvedki> (дата обращения: 14.02.19).
15. Gurenko B. The structure of automatic control systems for underwater gliders / B. Gurenko, A. Maevskiy, A. Kulchenko et al. // Proceedings of the 4th International conference on control, mechatronics and automation (ICCMA '16), New York. – NY, USA: ACM, 2016. – С. 88–91. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3029610.3029640>
16. Сухоруков А.Л. Об использовании эффекта планирования для движения подводных аппаратов / А.Л. Сухоруков, М.А. Титов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2012. – № 4. – С. 88–101.

Designing hybrid autonomous unmanned vehicles for exploration of hydrocarbon fields

A.M. Mayevskiy^{1,2*}, B.A. Gaykovich¹

¹ OCEANOS JSC, of. 1384, Bld. 2 A, Poeticheskiy boulevard, St. Petersburg, 194295, Russian Federation

² Southern Federal University, Bld. 105/42, Bolshaya Sadovaya street, Rostov-na-Donu, Rostov region, 344006, Russian Federation

* E-mail: office@oceanos.ru

Abstract. A special feature of the last decade is the high tempo of prospecting and development of the subsea hydrocarbon fields. Due to the high costs of such works, application of the autonomous underwater vehicle (AUV) seems quite expedient.

The article describes creation of a principally new submersible apparatus, which combines the main advantages of the traditional AUVs, of the submersible gliders and of the remotely operated vehicles armed with manipulators. The phase of project implementation and the results of the pilot tests are also discussed.

Keywords: oil&gas exploration, glider, autonomous underwater vehicle, subsea manipulator, marine robotics, subsea robotics.

References

1. Offshore projects [Shelfovyye proyekty]. In: *Rosneft* [online] [viewed on 14 April 2019]. Available from: <https://www.rosneft.ru/business/Upstream/offshore/>. (Russ.).
2. BAKHAREV, S.A. To a concept of construction of a multifunctional submersible vehicle [K voprosu kontseptsii postroyeniya podvodnogo mnogofunktsionalnogo sudna]. *Geofizicheskiy Vestnik*. 2010, no. 8, pp. 9–12. ISSN 1681-4568. (Russ.).
3. BAKHAREV, S.A., Ye.V. ZAVALKO, A.V. ROGOZHNIKOV. Using the broad-band receiving acoustic antennas in marine geophysics [Ispolzovaniye shirokopolosnykh priyemnykh akusticheskikh antenn v morskoy geofizike]. *Geofizika*. 2010, no. 1, pp. 45–51. ISSN 1681-4568. (Russ.).
4. BAKHAREV, S.A., Ye.V. ZAVALKO, A.V. ROGOZHNIKOV. Using the broad-band active acoustic antennas in marine geophysics for studying floor structure [Ispolzovaniye shirokopolosnykh izluchayushchikh akusticheskikh antenn v morskoy geofizike dlya issledovaniya struktury dna]. *Geofizika*. 2010, no. 6, pp. 33–38. ISSN 1681-4568. (Russ.).
5. BAKHAREV, S.A., V.B. KAZAKOV. The subaqueous-subglacial search of hydrocarbon fields in northern and Arctic waters [Podvodno-podlednyy poisk mestorozhdeniy uglevodorodov v severnykh i arkticheskikh akvatoriyakh]. *Vestnik RAN*. 2017, no. 2, pp. 47–55. ISSN 1682-1696. (Russ.).
6. AL-KHATIB, H., G. ANTONELLI, A. CAFFAZ etc. The widely scalable mobile underwater sonar technology (WiMUST) project: an overview. In: *Proceedings of MTS/IEEE Oceans'15*. Genova, Italy, 2015, pp. 1–5.
7. U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR; U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Circum-Arctic resource appraisal: Estimates of undiscovered oil and gas north of the Arctic Circle* [online]. U.S. Geological Survey, 2008, Fact Sheet 2008-3049. Available from: <https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/fs2008-3049.pdf>
8. GAUTIER, D.L., K. BIRD, R.R. CHARPENTIER et al. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic. *Science*. 2009, vol. 324, no. 5931, pp. 1175–1179. ISSN 0036-8075.
9. *Arctic oil and gas in the global energy picture by International Energy Agency*. 2010.
10. More than 40 big hydrocarbon fields in Russian sector of Arctic are awaiting production [Boleye 40 krupnykh mestorozhdeniy uglevodorodov v arktike v rossiyskom sektore zhdut dobuchi]. In: *neftegaz.ru* [online]. [viewed on 14 April 2010]. Available from: <https://neftegaz.ru/news/Geological-exploration/240207-bolee-40-krupnykh-mestorozhdeniy-uglevodorodov-v-arktike-v-rossiyskom-sektore-zhdut-dobychi/>. (Russ.).
11. RASKINA, A. Authorities are eager to let the private companies work at the Arctic shelf. However, will they go there? [Vlasti gotovy pustit chastnyye kompanii na arkticheskiy shelf. No poydut li oni tuda?]. In: *TASS* [online]. [Viewed on 14 April 2019]. Available from: <https://tass.ru/ekonomika/6319060>. (Russ.).

12. PSHIKHOPOV, V., M. MEDVEDEV, A. KOLESNIKOV et al. Decentralized control of a group of homogeneous vehicles in obstructed environment. *Journal of Control Science and Engineering*. 2016, article ID 7192371. ISSN 1687-5257.
13. PSHIKHOPOV, B.X., M.Yu. MEDVEDEV. Cluster control of mobile robots transitions in an uncertain environment using unstable regimes [Gruppovoye upravleniye dvizheniyem mobilnykh robotov v neopredelennoy srede s ispolzovaniyem neustoychivyykh rezhimov]. In: *Trudy SPIIRAN*. 2018, no. 5(60), pp. 39–63. ISSN 2078-9181. Available from: <https://doi.org/10.15622/sp.60.2>. (Russ.).
14. Using gliders for geological prospecting [Primeneniye glayderov dlya geologorazvedki]. In: *RoboTrends* [online]. [Viewed on 14 February 2019]. Available from: <http://robotrends.ru/pub/1837/primenenie-podvodnyh-glayderov-dlya-geologorazvedki>. (Russ.).
15. GURENKO, B., A. MAEVSKIY, A. KULCHENKO et al. The structure of automatic control systems for underwater gliders. In: *Proc. of the 4th International conference on control, mechatronics and automation (ICCMA '16), New York, NY, USA: ACM*, 2016, pp. 88–91. Available from: <https://doi.org/10.1145/3029610.3029640>
16. SUKHORUKOV, A.L., M.A. TITOV. On application of gliding effect for motion of submersible vehicles [Ob ispolzovanii effekta planirovaniya dlya dvizheniya podvodnykh apparatov]. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2012, no. 4, pp. 88–101. ISSN 2073-6673. (Russ.).