

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ МИНЕРАЛОВ

А.Ф. Щербатюк

Последние несколько десятков лет растет интерес к разработке полезных ископаемых, обнаруженных на морском дне. В первую очередь это связано с растущими потребностями современного промышленного производства и дефицитом определенных металлов, в том числе редкоземельных, в наземных рудниках. В статье описаны задачи, связанные с разработкой и испытанием в опытном режиме технологий добычи глубоководных минералов, и рассмотрены возможности использования необитаемых подводных аппаратов при их решении. Приведены некоторые данные о текущем состоянии в мире и России технологий добычи морских твердых полезных ископаемых. Обсуждены разработанные в ДВО РАН морские технологии с применением необитаемых подводных аппаратов, пригодные для решения задач, возникающих при добыче морских минералов, и рассмотрен опыт их использования.

Ключевые слова: глубоководные минералы, необитаемые подводные аппараты, технологии добычи глубоководных минералов.

1. Введение

Растущий спрос на металлы и минералы, в том числе в области морских технологий, привел к подъему интереса к разработке полезных ископаемых, обнаруженных на морском дне. Особый интерес многих индустриально развитых стран связан с перспективами добычи твердых полезных ископаемых – железомарганцевых конкреций (ЖМК), кобальтомарганцевых корок (КМК) и глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС), образующихся на дне Мирового океана. Железомарганцевые конкреции образуются на глубоководных абиссальных равнинах и содержат в основном марганец и железо, а также значительное количество других металлов, в том числе редкоземельных. Конкреции имеют овальную форму диаметром 4–15 см. Кобальтомарганцевые корки образуются на вершинах и склонах подводных вулканических гор (гайотов) и кроме кобальта и марганца содержат медь, никель, платину и другие металлы. Кобальт представляет экономический интерес, поскольку этот металл широко применяется в сверхпрочных сплавах, например, в реактивных двигателях, а также в технологии аккумуляторов.

Донные залежи полиметаллических сульфидов в основном связаны с активными гидротермальными источниками вдоль океанических хребтов, они богаты медью, золотом и другими металлами. Для гидротермальных источников характерны температуры до 400 °С и высокая кислотность.

Наряду с разработкой новых технологий на международном уровне формируются правовые, экологические и экономические нормы глубоководной добычи полезных ископаемых. Правовая основа деятельности стран в океане учитывает расстояния от береговой линии. Территориальное море прибрежного государства в соответствии с Конвенцией ООН по морскому праву (UNCLOS, 1982) простирается на 12 морских миль (22 км) от береговой линии и охватывает воздушное пространство, толщу воды до морского дна и недр. Прибрежные государства имеют исключительные права и юрисдикцию на ресурсы в пределах своей эксклюзивной экономической зоны (exclusive economic zone – EEZ), простирающейся на 200 морских миль (370 км). Юрисдикция некоторых государств расширена за пределы EEZ в пределах континентального шельфа, где они имеют суверенные права на морское дно и любые минераль-

ные ресурсы, но не на водное пространство. Дальше находится область, для которой используется термин «зона» (нейтральная зона), куда входят как морское дно, так и толща воды в открытом море. Ответственность за регулирование и контроль за деятельностью, связанной с разработкой минералов в зоне, несет Межправительственная Организация по морскому дну (МОМД) - International Seabed Authority (ISA), функционирующая под эгидой ООН [1].

К настоящему времени МОМД выдала 31 контракт на разведку компаниям, заинтересованным в проведении базовых исследований. Данные этих исследований дополняют фундаментальную науку о глубоководье. В настоящее время деятельность в зоне регулируется правилами МОМД ведения изысканий, но эксплуатация будет иметь гораздо большее воздействие на окружающую среду, чем изыскания. По этой причине утрата биоразнообразия, как следствие промышленной деятельности, является темой текущих обсуждений. МОМД планировала завершить их в 2020 году, но пандемия COVID-19 отодвинула этот процесс. Совет МОМД, который отвечает за доработку Кодекса майнинга, отказался встречаться виртуально и отложил все обсуждения до тех пор, пока члены не смогут встретиться лично, но не позднее середины 2023 года. До тех пор пока не будут выданы разрешения на коммерческую эксплуатацию, добыча полезных ископаемых в международных водах будет являться незаконной. Общественный контроль за управлением МОМД сдерживает зарождающуюся отрасль. Ученые и международные организации высказали критику по поводу низкого научного обоснования предлагаемых проектов и технологий [2].

Во второй части статьи описаны задачи, связанные с разработкой и испытанием в опытном режиме технологий добычи глубоководных минералов, а также с использованием необитаемых подводных аппаратов /НПА/ при их решении. Текущее состояние в мире и России технологий, связанных с разработкой морских минералов, рассмотрено в части 3. Далее, в части 4, описаны морские технологии с применением НПА, разработанные в ДВО РАН, и опыт их использования для решения широкого круга задач, аналогичных тем, которые возникают при добыче морских минералов.

2. Задачи, связанные с разработкой технологии добычи глубоководных минералов

При создании технологии добычи глубоководных минералов имеется несколько этапов – организация

разведки и картографирование запасов минералов, разработка и испытание в опытном режиме технологии добычи ископаемых и, после прохождения соответствующей экспертизы, добыча минералов в промышленных масштабах.

2.1. Разведка участков глубоководной добычи полезных ископаемых

Разведка участков глубоководной добычи полезных ископаемых является первым необходимым этапом в общем плане работ. Наиболее важными задачами в отношении быстрой и надежной разведки и выявления участков глубоководной добычи полезных ископаемых, являются:

- создание и использование технических средств для быстрого и эффективного 3D-картирования большой территории морского дна с использованием датчиков высокого разрешения и определения участков с высокой концентрацией минералов;
- разработка технологии определения элементного состава минералов, обнаруженных на этих рудниках;
- исследование влияния добывающей деятельности на биоразнообразии разработанных районов.

Традиционный метод, предполагающий использование телеуправляемых НПА /ТНПА/ вместе с судном обеспечения для оценки запасов и отбора проб минералов с морского дна для анализа и идентификации, чрезвычайно дорог, и его развертывание в море требует продолжительного времени. В последние годы все шире развивается направление, связанное с проектированием и использованием гибридных НПА, сочетающих в себе функции автономных НПА /АНПА/ и ТНПА, которые налагают менее серьезные требования к судам поддержки. Экономия затрат при использовании нескольких АНПА для решения той же задачи вместо ТНПА может достигать до 85% [3].

Возможной эффективной методикой использования группы АНПА для оценки запасов может быть следующая:

- Ведущий АНПА погружается на запрограммированную высоту (около 30 метров) и следует по пути типа меандр над заранее определенной рабочей зоной, чтобы собрать данные с помощью многолучевого эхолота или батиметрического ГБО.
- Полученные данные обрабатываются на борту ведущего АНПА для создания батиметрических карт и карт с ГБО-изображениями. На основе этих карт ведомым АНПА передаются

координаты областей с предполагаемой наиболее вероятностью обнаружения ЖМК.

- Ведомые АНПА переходят к заданным координатам и начинают детальную съемку с траекторией типа меандр на высоте около 2 м. При этом фотокамера используется в режиме реального времени для обнаружения на изображении объектов, похожих на ЖМК.
- При обнаружении залежи конкреций ведомый АНПА зависает над скоплением ЖМК и посредством бортовых сенсоров выполняет процедуру сканирования для анализа входящих в конкрецию элементов.

Наряду с ГБО и фотосъемкой для оценки запасов глубоководных минералов широко используются электромагнитные методы с применением НПА. В работе [4] описан метод для определения запасов полиметаллических сульфидов в области гидротермальной активности на дне океана посредством исследования их удельного сопротивления постоянному току. Для этих морских испытаний использовались два АНПА Jinbei и Yumeiruka и один автономный необитаемый водный аппарат /АНВА/ под названием HUBSea, который двигался по поверхности моря и обеспечивал связь с судном поддержки и навигацию АНПА. Jinbei буксировал стержень длиной около 20 м с двумя передающими электродами, а Yumeiruka буксировала стержень длиной около 20 м с шестью электродами, включая общий электрод. Полученные результаты электромагнитных исследований свидетельствуют о том, что метод чрезвычайно эффективен в качестве инструмента гидрофизической разведки. Описанный эксперимент был выполнен в рамках проекта под эгидой Японского Агентства морской науки и технологий о Земле (JAMSTEC).

2.2. Разработка и испытание в опытном режиме технологии добычи глубоководных минералов

Одним из основных элементов комплекса по добыче расположенных на дне минералов является обеспечивающее судно, учитывающее стабильность, структурную целостность и безопасность всего комплекса для выполнения подводной добычи. Оно включает в себя системы спуска и подъема оборудования для разработки месторождения на дне, устройства подъема, обезвоживания и обработки руды и пр.

Для подготовки добываемого на морском дне материала к транспортировке на обеспечивающее судно требуется широкий набор машин для добычи на морском дне. В большинстве конструкций таких машин используется гусеничный механизм опреде-

ленного типа с ножом или всасывающей головкой, в зависимости от целевых материалов. Разработаны и прошли предварительные морские испытания несколько типов подводных машин, предназначенных для добычи, размельчения, сбора и подачи на устройство доставки грунта на обеспечивающее судно.

Когда добытая порода достигает судна, вода должна быть удалена и возвращена примерно на ту же глубину, откуда грунт был извлечен. Произведенная вода из-за микробного содержания и перепада температур в соответствии с принятыми рекомендациями не может быть сброшена на поверхность моря. Это должна обеспечить система насосов и спускных устройств к морскому дну. Оставшаяся руда должна быть высушена и храниться до отправки на берег.

Для экономической эффективности добычи предполагается, что объем минералов от одного добывающего судна Mining Support должен быть не менее 1000 тонн высушенной руды в день. Таким образом экономика диктует необходимость использования челночного транспортировочного грузового судна, пока шахтерское судно остается на станции. Некоторые технические решения в этой области могут быть использованы из индустрии дноуглубительных работ.

Одной из наиболее сложных задач является подъем твердых ископаемых на поверхность с больших глубин. Имеется несколько способов выполнения указанной операции. Одним из них является эрлифтовый способ, который состоит в подаче воздуха на глубину для смешивания с размолотой породой и водой. При этом формируется смесь легче воды, которая естественным образом поднимается на поверхность по трубопроводу. Для реализации данного метода необходимо воздух доставлять под давлением, превышающим давление на рабочей глубине, которое увеличивается на 1 атмосферу при погружении на дополнительные 10 м и составляет около 350 атмосфер на глубине 3500 м. Мелководные системы эрлифта были сконструированы и испытаны, но нет информации об их масштабировании для глубоководных испытаний [5].

Другой способ предполагает создание смеси из размельченной породы и воды на дне и подъем ее на поверхность при помощи погружного насоса. Для реализации данного подхода требуется использовать насос морского исполнения высокой мощности и надежности. Подобный подводный насос был построен и испытан GE Subsea Systems для проекта Solwara1 [5]. Перспективным, с учетом современных технологий управления плавучестью, является способ, использующий челночные аппараты, которые обеспечивают доставку породы с места добычи на обеспечивающее судно.

2.3. Исследование влияния добывающей деятельности на биоразнообразие разработанных районов

Один из долгосрочных экспериментов, осуществленный в рамках инициативы «Экологические аспекты глубоководной добычи полезных ископаемых», был выполнен в 1989 г. в бассейне Перу (юго-восточная часть Тихого океана) на глубине 4140–4160 м. Эксперимент смоделировал в малых масштабах нарушение, которое могло быть вызвано промышленной разработкой ЖМК плугом, взрывлившим круговую область морского дна площадью 10,8 кв. км. Целью эксперимента было исследование восстановления биоты. Экспериментальная площадь была исследована несколько раз: до вмешательства, сразу после, далее спустя 6 месяцев, 3, 7 и 25 лет. После 25-летнего перерыва наблюдения в 2015 г. показывают сохранение первоначальных разрушений, сделанных плугом. Полученные данные указывают на то, что разработка конкреций в коммерческих масштабах нанесет длительный ущерб бентосной экосистеме. Исследование показало, что экосистема с ЖМК является уникальной средой обитания для бентосной мегафауны. Мобильные животные начали заселять вспаханную область вскоре после разработки, но даже через 25 лет их общее число по-прежнему оставалось низким по сравнению с данными, полученными до вмешательства.

Для гидротермальных источников необходимо более глубокое понимание того, как эти экосистемы могут реагировать на промышленную добывающую деятельность и какова вероятность естественного восстановления.

Помимо прямого воздействия на среду добычей деятельности оказывается побочное влияние на экологию. Работающее под водой оборудование и обеспечивающие суда на поверхности моря создают подводный шум. Антропогенный шум воздействует на ряд видов рыб и морских млекопитающих, вызывая изменение поведения, экранирование передачи информации и временные сдвиги порога звукового восприятия или его постоянное нарушение в зависимости от вида, типа и уровня воспринимаемого шума. Переработанный материал, который сливается как сточные воды с обеспечивающего судна, приведет к появлению глубоководных осадочных шлейфов. Выброс потенциально токсичных шлейфов, вероятно, повлияет на среду обитания далеко за пределами добывающих работ. Отходы от переработки минералов, которые возвращаются в морские глубины, а также работа оборудования в процессе добычи и возможное бурение будут выделять тепло. На ос-

нове полученных оценок предполагается, что отходы могут быть на 11 градусов теплее, чем окружающая морская вода, что может привести к повышению температуры на несколько градусов в районе работ. Непрерывные производственные процессы, которые используют прожекторы на обеспечивающих судах и машинах для разработки морского дна, значительно повысят уровень длительной освещенности, и это может изменить существующие условия на предполагаемых участках добычи.

В настоящее время вырабатываются методы и рекомендации для смягчения последствий добывающей деятельности и восстановления глубоководных мест обитания, которые включают:

- создание защищенных участков, в которых не происходит антропогенная деятельность, а также организация неразработанных биологических коридоров для перемещения биоты между защищенными участками;
- сведение к минимуму шума машин или шлейфов с остатками отработанных пород;
- искусственное восстановление обитателей после окончания добычных работ.

Существуют и прямые конфликты между различными областями человеческой деятельности в океане. Воздействие от разработки морского дна потенциально может оказывать негативное влияние на промышленное рыболовство. Рыболовственные компании являются активными противниками предложения по добыче железной руды у западного побережья Новой Зеландии. В намибийских водах в связи с разработкой месторождений фосфатов была установлена зона отчуждения, которая повлияла на основные рыболовственные участки для хека и ставриды [1].

Анализ глубоководной биоты как источника новых химических соединений для медицины является областью растущего коммерческого интереса. Морские глубины являются крупнейшим резервуаром генетических ресурсов, и многие компании уже имеют патенты на открытые на их основе лекарственные препараты. Биологические виды вблизи гидротермальных источников представляют особый интерес, поскольку они дают термостойкие ферменты, устойчивые к тяжелым металлам. Рынок морских генетических ресурсов велик и достиг миллиардов долларов США к 2020 г. Добыча полезных ископаемых может уничтожить генетические ресурсы, прежде чем они будут изучены или даже обнаружены. Осадочные шлейфы могут выходить за пределы выделенного участка подрядчика или проникать в пределы экономической зоны и наносить ущерб морской среде прибрежного государства.



Рис. 1. Несколько типов глубоководных беспилотных машин, разработанных и испытанных в Nautilus Minerals, предназначенных для сбора и измельчения глубоководных минералов

3. Текущее состояние в мире технологий, связанных с разработкой морских минералов

Одной из первых компаний, готовых начать промышленную добычу морских минеральных ресурсов, была компания Nautilus Minerals, которая предполагала добывать медь и золото из морских месторождений сульфидов, расположенных на глубине около 1500–2000 м в море Бисмарка. В 2009 г. Папуа-Новая

Гвинея выдала компании Nautilus Minerals лицензию на работу в море Бисмарка сроком на 25 лет, а в 2011 г. предоставила компании в аренду участок для разработки площадью около 59 км². Было изготовлено несколько типов глубоководных автономных машин (рис. 1), предназначенных для сбора и измельчения породы, которые прошли мелководные испытания. В Китае было построено судно для обеспечения глубоководных добычных работ. Однако в 2019 г. Nautilus Minerals из-за финансовых проблем была признана банкротом.

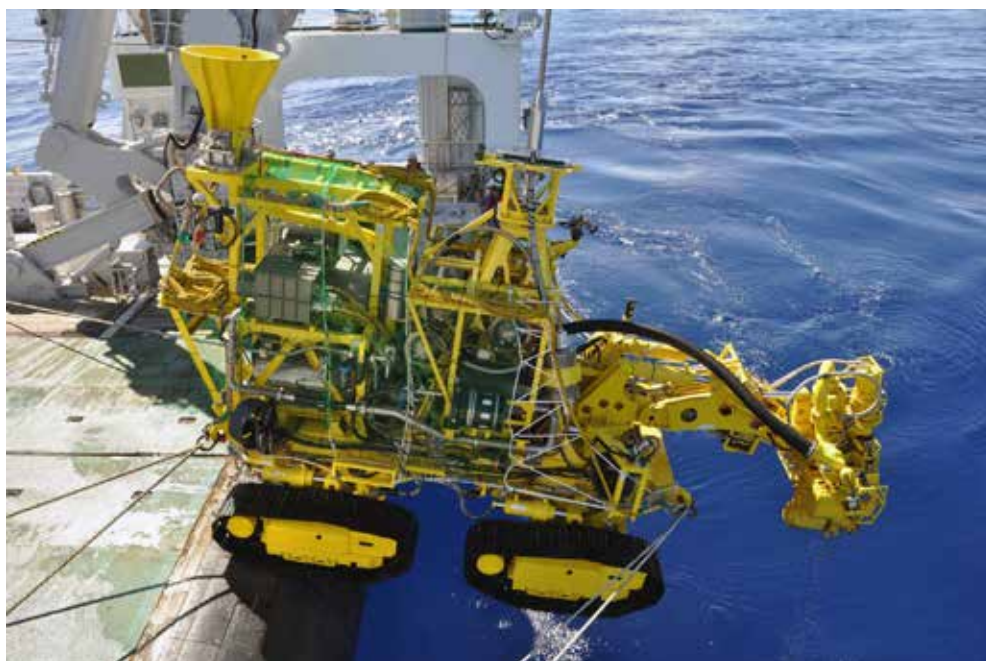


Рис. 2. Подводный беспилотный экскаватор для глубоководных минералов от компании JOGMEC (Япония)

В 2017 г. министерство экономики Японии сообщило об успешной пробной добыче залежи полезных ископаемых с глубоководных гидротермальных источников морского дна у берегов Окинавы в собственных территориальных водах. Компания JOGMEC задействовала экскаваторы (рис. 2) для доступа к рудному месторождению на глубине около 1500–1600 м и извлекла минеральную руду на поверхность моря.

Об испытаниях компонентов добычного комплекса на глубине уже объявили Корея (KIOST) – на глубине 1500 м (2017), Китай (COMRA), Великобритания и Lockheed Martin, Индия, Германия (BGR) и Aker Solutions (2019), Бельгия (GSR) и Германия (BGR) – испытание прототипа сборщика Patania-2 в реальных условиях (2019).

Россия является одним из крупных участников МОМД (рис. 3). Наша страна подписала с МОМД три пятнадцатилетних контракта [6]:

- Контракт на разведку железомарганцевых конкреций в восточной части Тихого океана, в зоне Клариион Клиппертон, с АО «Южморгеология» от 29 марта 2001 г. В 2016 г. контракт был продлен на пять лет.
- Контракт на разведку глубоководных полиметаллических сульфидов в западной части Тихого океана в районе Магеллановых гор с Минприроды России от 29 октября 2012 г.
- Контракт на разведку кобальтомарганцевых корок в районе Срединно-Атлантического хребта с Минприроды России от 10 марта 2015 г.

В соответствии с положениями МОМД государства или компании, прошедшие процедуру утвержде-

ния планов работ на разведку определенных видов минеральных ресурсов и заключившие с МОМД соответствующие контракты, сохраняют права на доступ к этим ресурсам только при безусловном выполнении контрактных обязательств. В случае их неисполнения возможны следующие последствия: отклонение просьбы о продлении контракта, решение о прекращении прав подрядчика и действия его контракта, а также утрата приоритета на заключение с МОМД контракта на добычу.

В России в настоящее время имеются глубоководные НПА для обеспечения разведки морских твердых полезных ископаемых. Одним из наиболее сложных по исполнению контрактных обязательств является разработка и испытание в опытном режиме технологии добычи ископаемых. Работы по проектированию и созданию собственно современной добычной техники и технологий пока не начаты [6]. Вследствие этого наша страна теряет свои позиции среди лидеров по добыче глубоководных минералов. Сейчас по политическим причинам не оправдан расчет на то, что РФ сможет такие машины купить. В связи с этим остро стоит вопрос организации и развития в России подводного машиностроения для глубоководной добычи минеральных ресурсов.

4. Морские технологии, разработанные в ДВО РАН, пригодные для решения задач, возникающих при добыче морских минералов

В соответствии с вышесказанным можно выделить следующие сопутствующие задачи при добыче



Рис. 3. Участки контрактов России

морских минералов, которые целесообразно решать с использованием НПА:

- Быстрое и эффективное 3D-картирование больших территорий морского дна с учетом минеральных ресурсов и биоразнообразия.
- Выделение участков с высокой концентрацией минералов. Сбор образцов для определения элементного состава минералов, обнаруженных на этих рудниках.
- Исследование влияния добывающей деятельности на биоразнообразие разработанных районов с учетом принятых смягчающих мер.
- Контроль за тем, чтобы добычные работы не выходили за пределы отведенных участков и не нарушали установленных биологических коридоров для перемещения биоты между защищенными участками.
- Отслеживание побочного влияния добывающей деятельности, определение концентрации и направления осадочных шлейфов, контроль величины шума, освещенности и температуры.

Вероятно, наибольшим опытом в России разработки необитаемых подводных аппаратов и выполнения глубоководных исследований в настоящее время обладает ИПМТ ДВО РАН. С 1972 г., сначала в ИАПУ, а затем с 1988 г. в ИПМТ создано более 10 различных типов АНПА, а также несколько типов ТНПА и других буксируемых НПА. ИПМТ по поручению Правительства РФ и МО РФ успешно выполнил более 30 глубоководных поисково-обследовательских работ мирового уровня.

В 1989 г. ИПМТ с применением АНПА МТ-88 (рис. 4, а) выполнил оценку запасов железомарганцевых конкреций (рис. 4, б) в районе Клариион-Клиппертон

с научно-исследовательского судна «Геолог Петр Антропов» производственного объединения «Дальморгеология» в рамках исследовательской программы «Интерокеанметалл» [7]. Результаты проведенного эксперимента подтвердили высокую эффективность применения АНПА для геологоразведки на больших глубинах [8]. В дальнейшем по заказу этой организации был изготовлен АНПА «Дальморгеология», который в 1992 г. был испытан на требуемой глубине 6000 м.

Позднее по контракту с южно-корейской фирмой DAEWOO был изготовлен АНПА ОКРО-6000 (рис. 5) для проведения экспериментальной геологоразведки на склонах подводных гор в районах бывшей вулканической деятельности. Одной из основных задач для этого подводного аппарата была оценка запасов кобальтомарганцевых корок в западной части Тихого океана.

Микрорельеф гайотов представляет собой сильно пересеченный рельеф с обломками вулканических образований. Отклонения микрорельефа от некоторой средней поверхности могут достигать более двух метров и образуют сложные преграды для пространственного движения АНПА, требуя наличия на его борту совершенной системы обхода препятствий. В связи с этим в подводном аппарате ОКРО-6000 была усовершенствована его система программного управления [9] для работы в условиях сильно пересеченного рельефа.

Можно отметить следующие наиболее значимые работы ИПМТ ДВО РАН, связанные со съемкой и картированием морского дна, опыт выполнения которых может быть использован при решении указанных выше задач при добыче морских минералов. В 2007 г. одним из первых в мировой практике подо

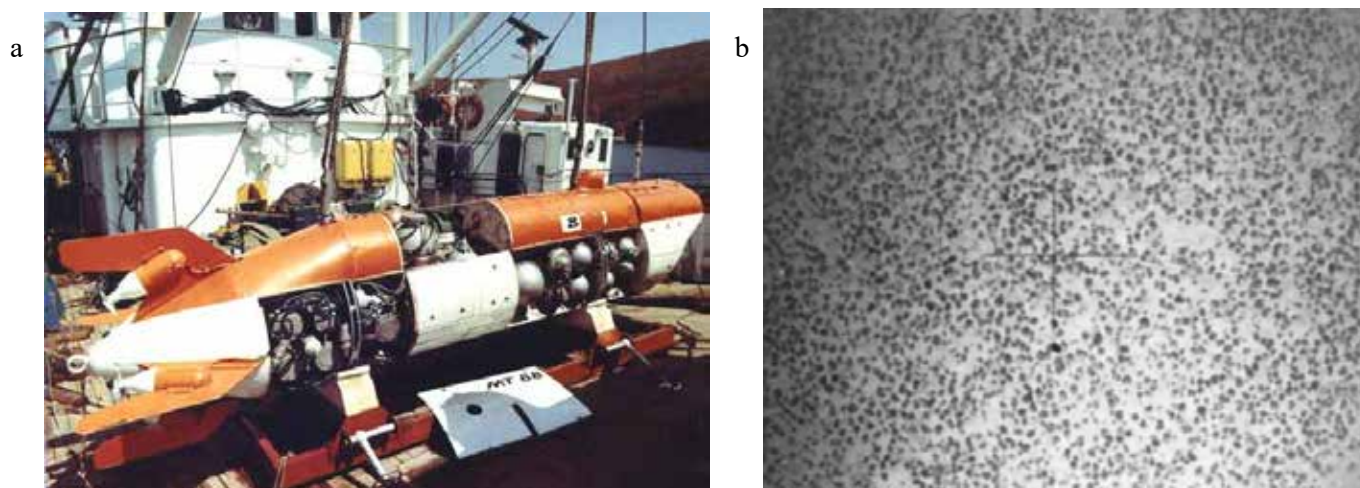


Рис. 4. Автономный необитаемый подводный аппарат МТ-88 (а), фото залежей ЖМК (б), полученное с помощью МТ-88 (высота съемки – 4 м). Место работ – участок Клариион-Клиппертон размером 12,5×20 км с перепадами глубин 4200–4600 м



Рис. 5. Автономный необитаемый подводный аппарат ОКРО-6000

льдами в полярных широтах применен АНПА Клавесин-1Р (рис. 6, а) на глубинах 1400–1600 м для изучения характеристик морского дна. Работа выполнялась в условиях сплошного ледяного покрытия с борта атомного ледокола «Россия» (рис. 6, б). На основе полученных данных составлены батиметрическая карта и планшет гидролокационного изображения, построены профили акустического зондирования поддонной структуры и получены многочисленные фотоматериалы [10]. Собранная информация вошла в доказательную базу того, что хребт Ломоносова является продолжением континентального шельфа Российской Федерации в северных морях.

Летом 2017 г. успешно выполнен уникальный контракт по договору с ООО «Морская геодезия» по съемке морского дна для планирования проклад-

ки оптокабеля от острова Сахалин до Курильских островов Кунашир и Итуруп [11]. Съемка выполнялась с помощью АНПА ММТ-3000 [12] на глубинах до 1500 м. Подводным аппаратом пройдено около 525 км со съемкой с помощью многолучевого ГБО, поддонного профилографа и магнитометра. На основе полученных измерений и стандартного геоинформационного программного обеспечения построены карты заданных участков морского дна. На рис. 7 изображено обеспечивающее судно «Владимир Сафонов» с АНПА ММТ-3000 на борту в процессе выполнения работ вблизи Курильских островов.

В ДВО РАН наибольшим опытом глубоководных биологических исследований, который может быть использован при исследовании влияния добывающей деятельности на биоразнообразии разработанных районов, обладает ИБМ. Этот институт является одним из инициаторов использования подводной робототехники для морских биологических исследований в акваториях Дальнего Востока. В нем разработана методологическая база трансектного мониторинга биологического разнообразия на особо охраняемых морских акваториях, а также начаты системные исследования и мониторинг биоразнообразия с помощью подводных аппаратов в глубоководной части Японского моря [13].

В отделе глубоководного оборудования ИБМ ДВО РАН находится наиболее оснащенный глубоководный ТНПА Comanche 18 (рис. 8). Штат отдела включает опытных инженеров различных направлений, многие из них прошли специализированные курсы по управлению и обслуживанию ТНПА непосредственно на



а



б

Рис. 6. АНПА Клавесин-1Р в Арктике (а), атомный ледокол «Россия» (б)



Рис. 7. АНПА ММТ-3000 на борту обеспечивающего судна «Владимир Сафонов» в процессе выполнения работ вблизи Курильских островов

базе ведущих мировых предприятий-производителей глубоководной техники. С 2011 г. ТНПА «Comanche 18» прошел 7 экспедиций в Японском, Охотском и Беринговом морях, а также в Тихом океане (Императорский хребет) и провел под водой более 500 ч. В течение этого времени был накоплен большой опыт работы с ТНПА и была выработана определенная технология выполнения подводных работ с борта НИС «Академик М.А. Лаврентьев». За время экспедиций было совершено множество успешных погружений на глубины до 4300 м. Подняты для исследований десятки видов глубоководных животных, сотни килограммов геологических образцов, пробы грунта и воды непосредственно из мест геотермальной активности, отсняты сотни гигабайт видео и фотоматериалов [14].

Разработанные технологии биомониторинга морских гидробионтов получили свое развитие в рамках реализации целевой комплексной программы /ЦКП/ ДВО РАН «Биологическая безопасность дальневосточных морей РФ» (2007–2012 гг.), в процессе выполнения которой под руководством ИБМ с участием ИПМТ проведены биологические мониторинговые исследования с ис-

пользованием подводной робототехники на акваториях дальневосточных морей России [15]. В работах использовался полуавтономный НПА TSL (рис. 9) [16]. Сформирована оценка биологического разнообразия и экологического состояния морской среды в Дальневосточном государственном морском заповеднике (рис. 10). Информация, полученная на длинных галсах, позволила оценить характер дна, наличие преобладающих видов, их состояние и плотность поселения. Эти данные, получаемые периодически, могут обрабатываться разными математическими методами и быть использованы для сравнительного анализа, изучения динамики популяций.

В рамках указанной ЦКП ИБМ ДВО РАН выполнил исследования воздействий на поверхность морского

дна в зонах донных рыболовных тралений в восточной части залива Петра Великого напротив залива Восток на глубинах 40–50 м на удалении от берега 5–10 миль. Выяснено, что донные борозды от траления могут сохраняться несколько месяцев и даже лет, существенно трансформируя донный ландшафт и эпибентосные биоценозы. Методика данных исследований может быть использована при изучении влияния промышленной разработки ЖМК плугами добывающих машин на бентосные экосистемы.



Рис. 8. ТНПА Comanche 18. Рабочая глубина 6000 м. Количество двигателей: 7 электродвигателей тягой по 100 кгс. Манипуляторы: 7-степенной ORION 7P, 4-степенной ORION 4R (SCHILLING ROBOTICS). Гидравлическая станция мощностью 15 кВт. Питание 3000 В/400Гц. Вес на воздухе около 2000 кг. Количество оптоволоконных каналов связи – 3 линии



Рис. 9. Подъем полуавтономного НПА TSL после завершения очередной миссии

Также для исследования биоразнообразия разрабатываемых районов с глубоководными минералами могут быть использованы методики, предложенные в процессе выполнения работ, проведенных ИПМТ ДВО РАН совместно с ТИНРО-центром, которые позволили провести оценку распределения макробентоса на обширных акваториях в заливе Петра Великого [17]. Исследуемые сообщества донных гидробионтов были представлены моллюсками, иглокожими, ракообразными, водорослями и морскими травами. В результате также получены данные по плотности поселения и размерам актиний, кукумарии и гастропод с площади около 1700 м².

Одной из указанных сопутствующих задач при добыче глубоководных минералов является определение концентрации и направления осадочных шлейфов, образующихся в процессе добывающей деятельности. Традиционные методики с использованием судов в общем случае дороги и не позволяют решать указанные задачи с требуемой точностью, особенно на глубине вблизи дна. Полученные с по-

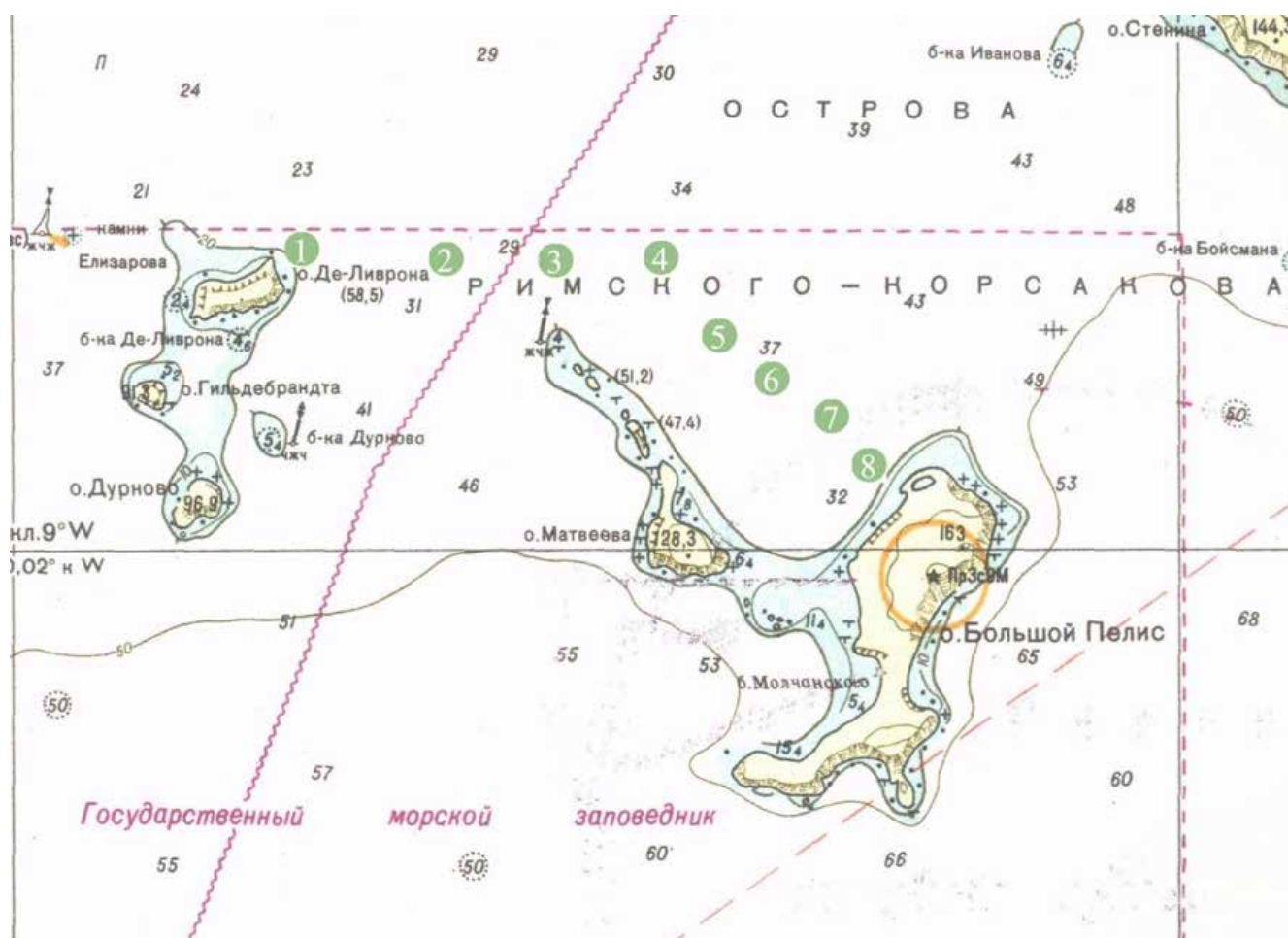


Рис. 10. Точки съемки вдоль трансекты от о-ва Де-Ливрона к о-ву Большой Пелис (зал. Петра Великого, ДВ государственный морской заповедник)

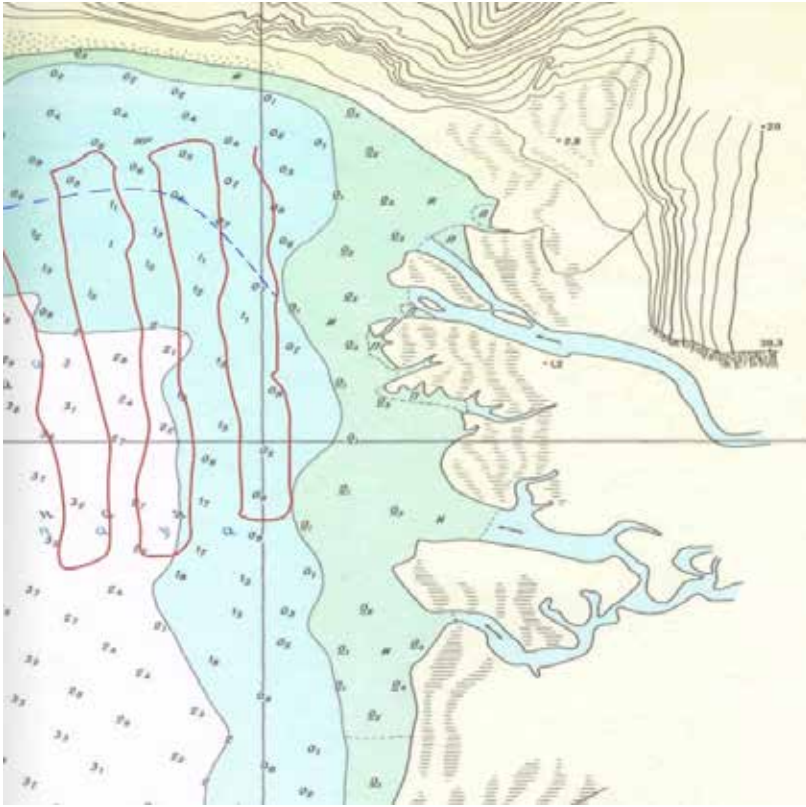


Рис. 11. Траектория движения АНПА ММТ-3000 с сенсорами для оконтуривания шлейфа холодной и пресной воды, образующегося в результате впадения реки Безымянная в бухту Воевода

мощью АНПА данные дают возможность осуществлять предсказательное моделирование для принятия решений и регулирования процесса добычи. Предполагается, что автономный аппарат оснащен навигационной системой, предназначенной для определения собственного местоположения с заданной точностью, и датчиком концентрации растворенного вещества.

В ИПМТ для АНПА разработаны адаптивные алгоритмы, основанные на формировании траекторий движения АНПА вдоль границы шлейфа загрязнения [18]. Для демонстрации данной технологии были выполнены исследования, связанные с оценкой распространения шлейфа пресной воды от реки Безымянная, впадающей в бухту Воевода, в районе острова Русский вблизи г. Владивостока с использованием АНПА ММТ-3000 [19]. Оценка выполнялась на основе измерения показаний солёности и температуры. На рис. 11 изображена одна из траекторий движения АНПА с сенсорами (красная ломаная), которая имела вид меандра. Исследования позволили локализовать шлейф пресной воды (синяя пунктирная кривая), которому соответствовала более холодная и менее солёная вода. В качестве измерителя использовался комплекс СТД зонд SBE-52MP. На рис. 12 приведена

результатирующая карта температур в области исследования.

Примером эффективности использования АНПА для подводного мониторинга является работа, которую в 2017 г. выполнил ИПМТ ДВО РАН по оценке экологического состояния в бухте Золотой Рог (г. Владивосток) [20]. Основанием для работы являлось техническое задание «Выполнение градиентных измерений гидрохимических (физических) характеристик морской воды с использованием подводного робота» в рамках мероприятия «Разработка программы по ликвидации накопленного экологического ущерба в бухте Золотой Рог, г. Владивосток (Приморский край)».

Целью работ являлось получение исходных данных для построения трёхмерной картины распределения физических и гидрохимических параметров водной среды в бухте вблизи места впадения реки Обьяснения, а также определение потенциальных возможностей применения подводных роботов для экологических исследований. С использованием АНПА ММТ-3000 продемонстрирована технология построения высокоточной

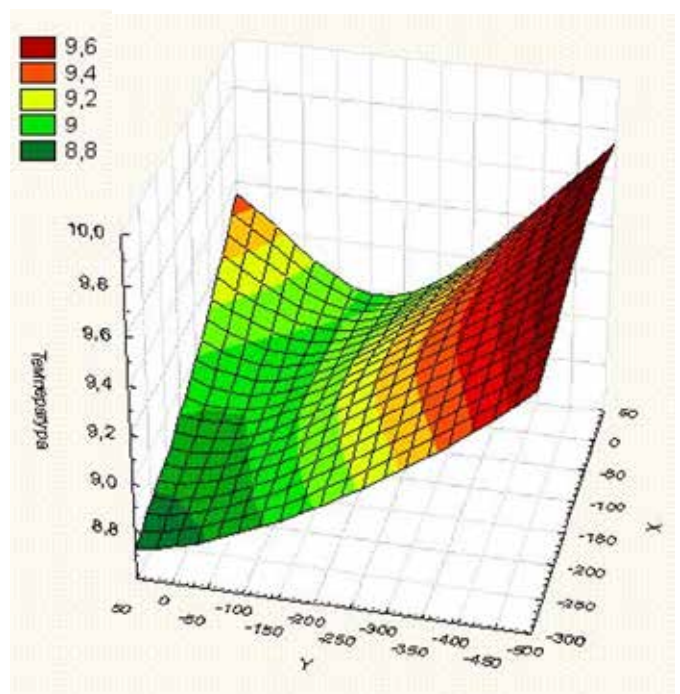


Рис. 12. Результатирующая карта температуры воды в районе исследования в бухте Воевода



Рис. 13. Место исследования в бухте Золотой рог вблизи места впадения реки Обьяснения (а), момент работы с АНПА ММТ 3000 (b)

карты градиентов распределения физических и гидрохимических параметров водной среды вблизи места впадения реки Обьяснения (рис. 13, а), где три цветные линии указывают на места выполнения вертикальных разрезов.

Для выполнения измерений аппарат был оснащен флуорометрами FLCDRT-926 (растворенная органика – CDOM) и FLNTU-665 (мутность и хло-

рофилл), установленными на внешней стороне корпуса (рис. 13, b). Температура и соленость измерялась прибором CTD-NV-2406. Указанные устройства были интегрированы в систему управления АНПА для обеспечения централизованного накопления данных. На рис. 14 показаны траектория движения АНПА в процессе вертикального профилирования, а также измерения CDOM.

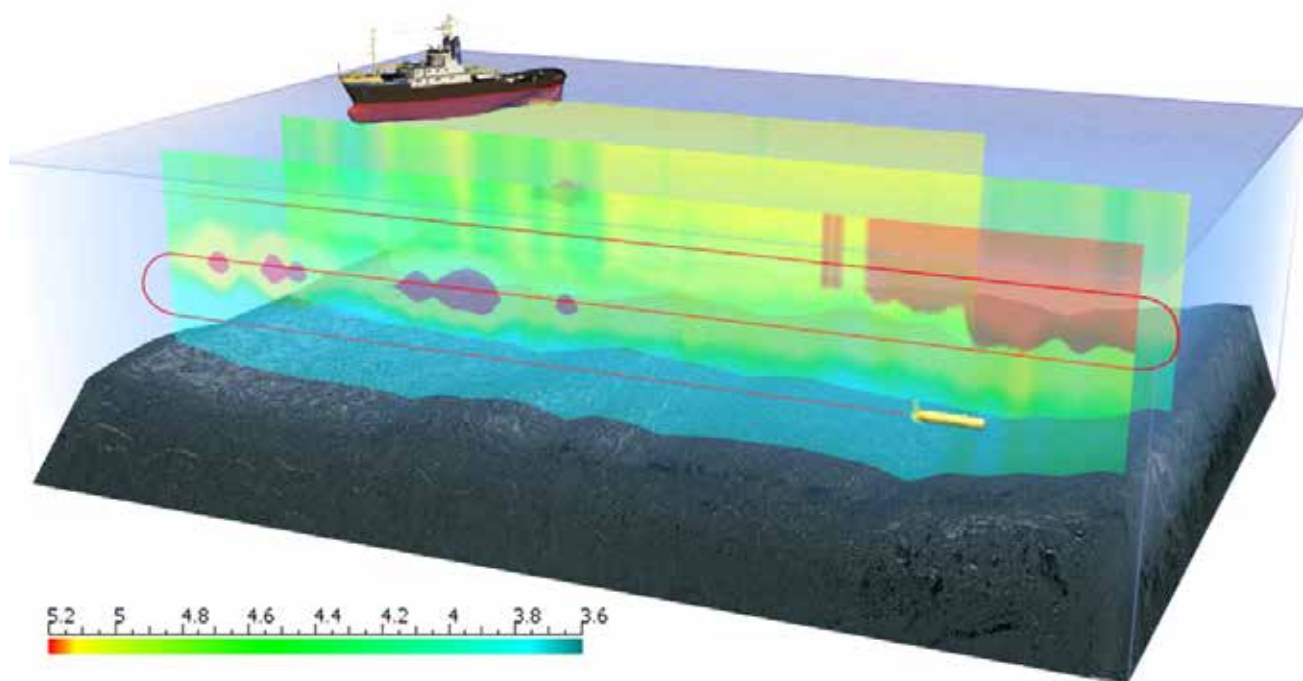


Рис. 14. Вертикальные профили движения АНПА и измерения CDOM

Еще одним подтверждением эффективности использования АНПА для глубоководного биологического мониторинга является применение подводных аппаратов серии ММТ-3000 в Антарктике в исследованиях комплексной экспедиции РАН в рамках программы «Изучение биоразнообразия донных сообществ Южных морей» [21]. В данной программе головным является Институт океанологии РАН, а от ДВО РАН в ней принимают участие ТОИ, ИБМ и ИПМТ. Исследования выполнены с борта НИС «Академик Мстислав Келдыш» в бассейне Пауэлла моря Уэдделла, проливах Брансфилда и Антарктик, а также к востоку от Южных Оркнейских островов. Эти районы являются ключевыми для понимания современных процессов в экосистеме Южного океана и представляют интерес для российского промысла.

В рамках указанной программы в 2020 г. состоялся 79-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш». ИПМТ ДВО РАН принимал участие с АНПА ММТ-3000, который использовался при выполнении комплексных исследований экосистем Антарктики и глубоководных биологических ресурсов южных морей. В результате работ были получены данные в области морской биологии, гидрофизики и гидрохимии, изучены характер рельефа и структура морского дна [22]. Замечания и рекомендации, полученные во время этой экспедиции, позволили сформулировать техническое задание для нового аппарата ММТ-3500, специально предназна-



Рис. 15. АНПА ММТ-3500 во время работ в Антарктике

ченного для работы в экстремальных условиях Антарктики.

Очередной 87-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» по данной программе выполнен в 2022 г. В нем ИПМТ ДВО РАН принял участие с новым АНПА ММТ-3500. Рейс был направлен на исследования, необходимые для оценки современного состояния экосистем Антарктики, их уязвимости при воздействии промысла, влияния климатических изменений на морские природные комплексы Антарктики, роли Южного океана в глобальных климатических изменениях [23, 24]. Получены материалы, характеризующие состояние среды, пелагических сообществ, включая популяцию антарктического криля и мезопелагических рыб, донную фауну, пространственную и временную изменчивость важнейших компонентов экосистем. С помощью АНПА ММТ-3500 выполнена съемка рельефа дна трассы суммарной длиной более 6 км с помощью МЛЭ и ГБО. Выполнен мониторинг морской донной экосистемы, в результате получены 10890 фотографий морского дна на глубинах до 1800 м.

Заключение

В настоящее время растет интерес к разработке глубоководных полезных ископаемых. Это связано с тем, что современное промышленное производство испытывает дефицит определенных металлов. Изыскание и добыча глубоководных минералов в международных водах должны выполняться в соответствии с требованиями, выработанными Межправительственной организацией по морскому дну. При этом на этапе тестирования технологий добычи и в процессе промышленной разработки подводных месторождений необходимо решать ряд сопутствующих задач, связанных с уменьшением воздействия на экологию и донные биосистемы.

Эффективные способы решения указанных задач основаны на использовании необитаемых подводных аппаратов. С их помощью могут быть выполнены:

- быстрое и эффективное 3D-картирование больших территорий морского дна для учета минеральных ресурсов и биоразнообразия;
- исследование влияния добывающей деятельности на биоразнообразие разработанных районов;
- контроль за выполнением добычных работ и отслеживание их побочного влияния посредством определения концентрации и направления осадочных шлейфов;

– контроль величины шума, освещенности и температуры.

Приведенные данные об имеющихся в институтах ДВО РАН разработках и выполненных исследованиях с использованием необитаемых подводных аппаратов

свидетельствуют о том, что полученный опыт позволит решать большую часть сопутствующих задач (указанных в п. 4), обязательных в рамках требований МОМД в соответствии с высокими международными стандартами при добыче глубоководных минералов.

ЛИТЕРАТУРА

1. An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps // *Frontiers in Marine Science*. 2018. Vol. 4.
2. <https://eos.org/features/the-2-year-countdown-to-deep-sea-mining>
3. Sartore C., Simetti E., Wanderlingh F., Casalino G. Autonomous Deep Sea Mining Exploration: The EU ROBUST Project Control Framework // *OCEANS 2019, Marseille*.
4. Takafumi Kasaya, Tadahiro Hyakudome, Hisanori Iwamoto. New Geophysical Survey Style: Using AUV-ASV Combo to Find Hydrothermal Sulfide Deposits // *Sea Technology*. August 2019. P. 10–13.
5. Lipman A., Yu A. Subsea Mining // *Marine Technology Reporter*. 2019, November/December. P. 20–25.
6. Горшков А.Г. Технологические вопросы освоения металлосодержащих полезных ископаемых Мирового Океана. // *Морские информационно-управляющие системы*. 2019. № 1. С. 54–73.
7. Автономные подводные роботы: системы и технологии // под ред. акад. М.Д. Агеева.; М.: Наука, 2005. 398 с.
8. Никифоров В.В. Автономный робот-разведчик глубоководных полезных ископаемых // *Вестн. ДВО АН СССР*. 1990. №4 (37). С. 56–61.
9. Ageev M.D., Kiselev L.V., Inzartsev A.V., Medvedev A.V. Some Questions of the AUV Control in Surveying the Seamounts // *Proceedings of the 33rd Underwater Mining Institute, Korea, October 7–8, 2003*. P. 35–37.
10. 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.
11. Горнак В.Е., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. ММТ-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН // *Подводные исследования и робототехника*. 2007. №1(3). С. 12–20.
12. Михайлов Д.Н., Сенин Р.Н., Дубровин Ф.С., и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для гидрографических исследований в Охотском море // *Подводные исследования и робототехника*. 2017. № 2 (24). С. 4–13.
13. Адрианов А.В., Тарасов В.Г., Щербатюк А.Ф. Применение и перспективы сезонного видеомониторинга на особо охраняемых морских акваториях залива Петра Великого (Японское море) // *Вестн. ДВО РАН*. 2005. №1. С. 19–26.
14. Даутова Т.Н., Денисов В.А., Коноплин А.Ю., Кузнецов А.Л., Московцева А.В. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // *Подводные исследования и робототехника*. 2019. № 4 (30). С. 4–12.
15. Использование подводной робототехники в биологических исследованиях на Дальнем Востоке России. Биологическая безопасность дальневосточных морей Российской Федерации: Материалы Целевой комплексной программы ориентированных фундаментальных научных исследований Дальневосточного отделения РАН на 2007–2012 гг. / отв. ред. А.В. Адрианов. Владивосток: Дальнаука, 2014. С. 79–121.
16. Агеев М.Д., Горнак В.Е., Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В., Щербатюк А.Ф. и др. Модернизированный TSL – подводный аппарат для работы на шельфе и в тоннелях // *Морские технологии*. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 3. С. 23–38.
17. Щербатюк А.Ф., Ваулин Ю.В., Якубова Л.Е., Явнов С.В. Использование подводного аппарата TSL для поиска скоплений, оценки видового состава и численности донных гидробионтов на шельфе // *Морские технологии*. Вып. 5. Владивосток, 2003.
18. Щербатюк А.Ф., Бабак Л.Н. Об одном алгоритме поиска источника подводного шлейфа, основанном на использовании группы АНПА // *Управление большими системами*. Вып. 30.1 «Сетевые модели в управлении». М.: ИПУ РАН, 2010. С. 536–548.
19. Горнак В.Е., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. ММТ-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН // *Подводные исследования и робототехника*. 2007. №1(3). С. 12–20.
20. Инзарцев А.В., Ваулин Ю.В., Каморный А.В., Щербатюк А.Ф. и др. Опыт использования АНПА типа ММТ-3000 для экологических исследований в бухте Золотой Рог. // *Экологические системы и приборы*, 2018. № 12. С. 38–45.
21. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Спиридонов В.А., Тараканов Р.Ю. Программа комплексных экспедиционных исследований экосистемы Атлантического сектора Южного океана (декабрь 2019 г., март 2020 г.) // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 6. С. 1086–1088.
22. Коноплин А.Ю., Михайлов Д.Н., Щербатюк А.Ф. и др. Технология использования АНПА для исследования глубоководных экосистем Атлантического сектора Антарктики // *Подводные исследования и робототехника*. 2020. №2 С. 13–21.
23. Бабаев Р.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Елисеенко Г.Д., Михайлов Д.Н., Найдено Н.А. Применение АНПА «ММТ-3500» для научных исследований в атлантическом секторе Антарктики // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. №3. С. 15–30.
24. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М., и др. Гидрофизические и экосистемные исследования в Атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 5. С. 1–3.

Об авторе

ЩЕРБАТЮК Александр Федорович, д.т.н., чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
Адрес: 690041, г. Владивосток, улица Радио, 5

Научные интересы: разработка и использование морских робототехнических комплексов, навигационное обеспечение необитаемых подводных аппаратов
Тел.: +7(902)52-38-156
E-mail: alex-scherba@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-7600-6711

Для цитирования:

Щербатюк А.Ф. ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЛУБОКОВОДНЫХ МИНЕРАЛОВ // *Подводные исследования и робототехника*. 2023. №. 2 (44). С. 4–19. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_01. EDN: EOLJVM.

ON THE USE OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLES IN THE DEVELOPMENT OF DEEP-SEA MINERAL DEPOSITS

A.F. Scherbatyuk

Over the past few decades, there has been a growing interest in the development of minerals found on the seabed. First of all, this is due to the growing needs of modern industrial production and the shortage of certain metals, including rare earths, in onshore mines. The article describes the tasks associated with the development and trial testing of technologies for the extraction of deep-sea minerals, and considers the possibilities of using unmanned underwater vehicles in their solution. Some data on the current state of technologies for the extraction of marine solid minerals in the world and Russia are given. Marine technologies developed in the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences with the use of unmanned underwater vehicles suitable for solving problems arising from the extraction of marine minerals are discussed, and the experience of their use is considered.

Keywords: deep-sea minerals, unmanned underwater vehicles, deep-sea mineral extraction technologies.

References

1. An Overview of Seabed Mining Including the Current State of Development, Environmental Impacts, and Knowledge Gaps. *Frontiers in Marine Science*, 2018, Volume 4.
2. <https://eos.org/features/the-2-year-countdown-to-deep-sea-mining>
3. Sartore C., Simetti E., Wanderlingh F., Casalino G. Autonomous Deep Sea Mining Exploration: The EU ROBUST Project Control Framework. *OCEANS*, 2019, Marseille.
4. Takafumi Kasaya, Tadahiro Hyakudome, Hisanori Iwamoto. New Geophysical Survey Style: Using AUV-ASV Combo to Find Hydrothermal Sulfide Deposits. *Sea Technology*, August, 2019, pp. 10-13.
5. Lipman A., Yu.A. Subsea Mining. *Marine Technology Reporter*, 2019, November/December, pp. 20-25.
6. Gorshkov A.G. Technological issues of the development of metal-containing minerals of the World Ocean. *Marine Information and Control Systems*, 2019, No. 1, pp. 54-73.
7. Autonomous underwater robots: systems and technologies. Ed. akad. M.D. Ageev; Moscow: Nauka, 2005. 398 p.
8. Nikiforov V.V. Autonomous robot scout of deep-sea minerals. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the USSR Academy of Sciences*, 1990, No. 4(37), pp.56-61.
9. Ageev M.D., Kiselev L.V., Inzartsev A.V., Medvedev A.V. Some Questions of the AUV Control in Surveying the Seamounts. *Proceedings of the 33rd Underwater Mining Institute, Korea*, October 7-8, 2003, pp. 35-37.
10. Inzartsev A.V., Kamorny A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Rylov N.I. Application of an autonomous unmanned underwater vehicle for scientific research in the Arctic. *Underwater Investigations and Robotics*. 2007. No. 2 (4). pp. 5-14.
11. Gornak V.E., Inzartsev A.V., Lviv O.Yu., Matvienko Yu.V., Scherbatyuk A.F. MMT-3000 – a new small-sized autonomous unmanned underwater vehicle IMTP FEB RAS. *Underwater Investigations and Robotics*, No. 1(3), 2007, pp.12-20.
12. Mikhailov D.N., Senin R.N., Dubrovin F.S., et al. The use of an autonomous unmanned underwater vehicle for hydrographic research in the Sea of Okhotsk. *Underwater Investigations and Robotics*. 2017. No. 2 (24). pp. 4-13.
13. Adrianov A.V., Tarasov V.G., Scherbatyuk A.F. Application and prospects of seasonal video monitoring in specially protected marine areas of Peter the Great Bay (Sea of Japan). *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2005. No.1, pp.19-26.
14. Dautova T.N., Denisov V.A., Konoplin A.Yu., Kuznetsov A.L., Moskovtseva A.V. Technology of using ROV for complex research of deep-sea ecosystems. *Underwater Investigations and Robotics*. 2019. No. 4 (30), pp. 4-12.
15. The use of underwater robotics in biological research in the Russian Far East. Biological safety of the Far Eastern seas of the Russian Federation: Materials of the Target integrated program of oriented fundamental scientific research of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for 2007-2012. Ed. A.V. Adrianov. Vladivostok: Dalnauka, 2014, pp. 79-121.
16. Ageev M.D., Gornak V.E., Matvienko Yu.V., Vaulin Yu.V., Scherbatyuk A.F., etc. The upgraded TSL is an underwater vehicle for working on the shelf and in tunnels. In the collection “Marine Technologies” Vol. 3. Vladivostok, Dalnauka, 2000, pp. 23-38.
17. Scherbatyuk A.F., Vaulin Yu.V., Yakubova L.E., Yavnov S.V. Using the TSL underwater vehicle to search for clusters, assess the species composition and abundance of bottom hydrobionts on the shelf. In the collection “Marine Technologies” Issue 5, Vladivostok, 2003.
18. Scherbatyuk A.F., Babak L.N. About an algorithm for finding the source of an underwater plume based on the use of the AUV group. *Management of Large systems*, issue 30.1 “Network models in Management”, IPU RAS, Moscow, 2010, pp. 536-548.

19. Gornak V.E., Inzartsev A.V., Lviv O.Yu., Yu.V. Matvienko, A.F. Scherbatyuk. MMT-3000 is a new small-sized autonomous unmanned underwater vehicle IPMT FEB RAS. *Underwater Investigations and Robotics*, No. 1(3), 2007, pp. 12-20.

20. Inzartsev A.V., Vaulin Yu.V., Kamorny A.V., Scherbatyuk A.F., etc. Experience of using MMT-3000 type AUV for ecological research in the Golden Horn Bay. *Ecological systems and instruments*, 2018, No. 12, pp. 38-45.

21. Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A., Tarakanov R.Yu. Program of complex expeditionary studies of the ecosystem of the Atlantic sector of the Southern Ocean (December 2019 March 2020). *Oceanology*. 2019. Vol. 59, No. 6, pp. 1086-1088.

22. Konoplin A.Yu., Mikhailov D.N., Scherbatyuk A.F., etc. The technology of using AUV for the study of deep-sea ecosystems of the Atlantic sector of Antarctica. *Underwater Investigations and Robotics*, No.2, 2020, pp. 13-21.

23. Babaev R.A., Borovik A.I., Vaulin Yu.V., Eliseenko G.D., Mikhailov D.N., Naidenko N.A. Application of AUV “MMT-3500” for scientific research in the atlantic sector of Antarctica. *Underwater Investigations and Robotics*, No. 3, 2022, pp. 15-30.

24. Morozov E.G., Flint M.V., Orlov A.M., et al. Hydro-physical and ecosystem research in the Atlantic sector of Antarctica (87th voyage of the research vessel “Academician Mstislav Keldysh”). *Oceanology*. 2022. Vol. 62. No. 5, pp. 1-3.

About the author

SCHERBATYUK Alexander Fedorovich, Doctor of Technical Sciences., corr.-member of RAS, chief scientist
Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences

Address: 5, Radio st., Vladivostok, 690041, Russia

Research interests: designing and application of marine robotic systems, positioning of unmanned underwater vehicles

Phone: +7(902)52-38-156

E-mail: alex-scherba@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-7600-6711



Recommended citation:

Scherbatyuk A.F. ON THE USE OF UNMANNED UNDERWATER VEHICLES IN THE DEVELOPMENT OF DEEP-SEA MINERAL DEPOSITS. *Underwater investigations and robotics*. 2023. No. 2 (44). P. 4–19. DOI: 10.37102/1992-4429_2023_44_02_01. EDN: EOLJVM.