

РАЗРАБОТКА ДОБЫЧНЫХ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С УЧЁТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

С.И. Петухов¹, А.В. Григорчук², Л.А. Ермакова¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И. С. Грамберга» (ФГБУ "ВНИИОкеангеология"), Санкт Петербург
petukhov@vniio.ru; l.ermakova@vniio.ru

² Общество с ограниченной ответственностью "Гидравлический комплекс" (ООО «ГИКО»), Санкт Петербург hycomarine@gmail.com.

Аннотация

Статья посвящена вопросам добычи полезных ископаемых на морском дне и связанными с этим экологическими проблемами. Рассматриваются как традиционные добычные комплексы, включающие самоходные гусеничные агрегаты, так и инновационные с использованием роботов-сборщиков. Добычные комплексы, включающие автономные роботы сборщики, скользящие над дном океана, наносят минимальный вред целостности глубоководной океанской экосистемы. Разработка экологически привлекательной добычной техники для сбора конкреций является актуальной задачей на фоне постоянных призывов заморозить все проекты по разработке твердых полезных ископаемых (ТПИ) на дне океана.

Ключевые слова: глубоководная добыча, сборщики, конкреции, Международный орган по морскому дну, охрана окружающей среды, плум, плавучие роботы.

Введение

Текущее десятилетие (2021-2030 гг.) объявлено Генеральной Ассамблеей ООН Десятилетием ООН, посвященным науке об океане в интересах устойчивого развития. Одним из важнейших направлений в данной связи является освоение ресурсов Мирового океана (в частности, полезных ископаемых морского дна).

На суше еще достаточно месторождений металлов, необходимых для удовлетворения будущего на них спроса, но эти ресурсы могут быть извлечены уже только с все более высокими экономическими, социальными и экологическими издержками. Для получения металлов высокого качества, горнорудные компании вынуждены отрабатывать более глубокие пласты залегания полезных ископаемых, расширять границы карьеров, нанося при этом все больше вреда окружающей среде. На сегодняшний день основные месторождения никеля, кобальта и марганца расположены в Индонезии, Демократической Республике Конго (ДРК) и Южно-Африканской Республике. При наземной добыче кобальта в ДРК широко используется детский труд. Ожидается, что основной рост поставок никеля будет обеспечиваться за счет отработки никелевых латеритов под тропическими лесами Индонезии и Филиппин, что может привести к уничтожению наземных экосистем и иметь глубокие социальные последствия.

Глубоководная добыча полиметаллических конкреций могла бы снизить большую часть нагрузки на окружающую среду суши и предотвратить социальное напряжение, вызванное вырубкой лесов при наземном производстве металлов. В одной конкреции находятся высокие содержания четырех ключевых металлов, а это означает, что для получения того же количества металла необходимо перерабатывать в четыре раза меньше руды. Полиметаллическая конкреция может быть использована целиком, что делает возможным производство практически нулевых твердых отходов. Поскольку конкреции находятся на поверхности морского дна и не прикреплены к ним, для их извлечения не потребуется бурение или взрывные работы.

Для обеспечения устойчивой морской экономики перед тем, как приступить к освоению глубоководных месторождений, крайне необходимо разработать и создать экономически эффективный и экологически безопасный добычный комплекс.

Схемы добычи конкреций

Промышленная добыча глубоководных твердых полезных ископаемых (ТПИ) связана с комплексным проведением трех отдельных операций: сбор рудного материала на дне океана, подъём на плавсредство, предварительное обогащение и подготовка ТПИ к транспортировке на сушу.

Большинство контрактов Международного органа по морскому дну (МОМД), среди которых компании NORI (Япун), GSR (Бельгия), COMRA (Китай), институты BRG (Германия), NIOT (Индия), в своих концепциях проведения добычи ЖМК остановились на схеме добычи с гусеничным сборщиком и трубным ставом.

На сегодняшний день наиболее глубоко проработанным коммерческим проектом на ЖМК является схема добычи, разрабатываемая The Metals Company (TMC, Канада) [1], которая основана на системе сбора руды гусеничным сборщиком и подъём ее на судно трубным ставом с использованием эрлифта. В 2022 году эта компания провела успешные испытания своего добычного комплекса, разработанного совместно с компанией Allseas, на контрактном участке NORI-D в зоне разломов Клариян-Клиппертон в Тихом океане. В ходе испытаний было собрано и поднято на судно более 3000 тонн конкреций. Компания намерена приступить к промышленной добыче в 2025 году. TMC прогнозирует, что производительность с использованием четырех одновременно работающих коллекторов на дне к 2031 году достигнет 14 миллионов тонн конкреций.

Глубоководная добыча полезных ископаемых в этом варианте предполагает использование многотонных машин-сборщиков, работа которых приведет к возникновению и распространению шлейфов взмученных донных отложений, или плюмов. Кроме того, после проведения на борту судна операций по обезвоживанию конкреций отработанная вода будет

сбрасываться в водную толщу, что также приведет к образованию шлейфов (плюмов) на глубине сброса (Рисунок 1).

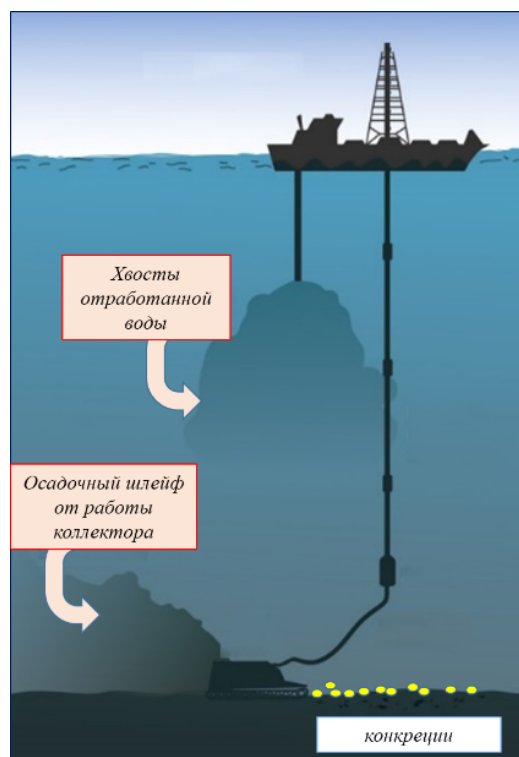


Рис. 1 Образование плюмов при использовании гусеничных сборщиков конкреций

Ожидается, что именно возникновение и распространение плюмов, а также переосаждение содержащихся в них частиц, будут оказывать наиболее сильное воздействие на окружающую среду в ходе добычи глубоководных полезных ископаемых.

Обитающие в условиях крайне низких скоростей седиментации, обитатели глубоководных донных экосистем окажутся в условиях избытка взвешенных частиц грунта, которые могут привести к непосредственным повреждениям живых организмов, блокировке их дыхательных систем, повлиять на способность к питанию животных-фильтраторов, а также уменьшить доступность твердого субстрата, повлияв тем самым на способность расселительных стадий к колонизации.

Сбросы в водную толщу после первичной обработки конкреций на борту судна приведут к поступлению в нее вод с иными термохалинными и гидрохимическими характеристиками, нежели окружающая среда, что также может оказать губительное воздействие на живые организмы, в том числе и токсическое (вследствие токсичности тяжелых металлов, которые будут высвобождаться в раствор в процессе обезвоживания). Кроме того, как и в случае с придонными плюмами, опасность будут представлять и взвешенные частицы грунта, распространяющиеся в плюме.

Следует отметить, что вследствие недостаточности данных о свойствах

потенциальных плюмов, механизмах их распространения и осаждения, а также о полях течений (особенно на больших глубинах), в настоящее время не ясно, насколько далеко от места производства работ они могут распространяться.

Значительный вред придонным организмам будет нанесен и гусеницами многотонного сборщика, который будет не только удалять твердый субстрат вместе с прикрепленной фауной, но и удалять и повреждать мягкие осадки и обитающие в них живые организмы.

В связи с обозначенными проблемами по сохранению окружающей среды при проведении добычных работ на морском дне все большую популярность набирают более экологически привлекательные варианты.

Селективные комплексы добычи конкреций

Среди экологически привлекательных добычных комплексов, основанных на выборочном сборе конкреций с использованием плавающих роботов-сборщиков рассматривается разработки компаниями ГИКО (Россия) и Impossible metals (США).

Компания Impossible Metals (США) [2] уже несколько лет разрабатывает свою экспериментальную концепцию селективной добычи глубоководных полиметаллических конкреций [<https://impossiblemetals.com/blog/first-combined-esg-and-annual-report-is-now-available/>].

В планы компании входит разработка флота АНПА-роботов, оснащенных манипуляторами для селективного сбора конкреций, которые собирают конкреции нанося при этом минимальные нарушения донных отложений и экосистем морского дна.

Компания Impossible Metals уже создала две модификации автономного подводного аппарат –сборщика (АНПА) для добычи конкреций – «Эврика 1 и 2» (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**).



Рис. 2 Концепция сбора конкреций (Impossible Metals)

Схема работы по добыче конкреций включает: 1-распознавание конкреций с помощью системы искусственного интеллекта; 2-селективный отбор конкреций (58 манипуляторов); 3- помещение конкреций в лоток-приемник; 4- перемещение конкреций в накопительный бункер (25 тонн). 5-подъем аппарата на поверхность и выгрузка конкреций.

АНПА будет скользить над морским дном и выборочно собирать, идентифицируемые с помощью применения искусственного интеллекта конкреции, сводя к минимуму нарушение среды обитания организмов морского дна. Загрузив размещенный на нем контейнер собранными конкрециями, АНПА самостоятельно поднимаются на поверхность, и далее будут захватываться кранами и разгружается на судне поддержки производства. Предполагается, что флот, состоящий из 6 АНПА-сборщиков конкреций, будет создан уже в 2025 году. Рисунок 3

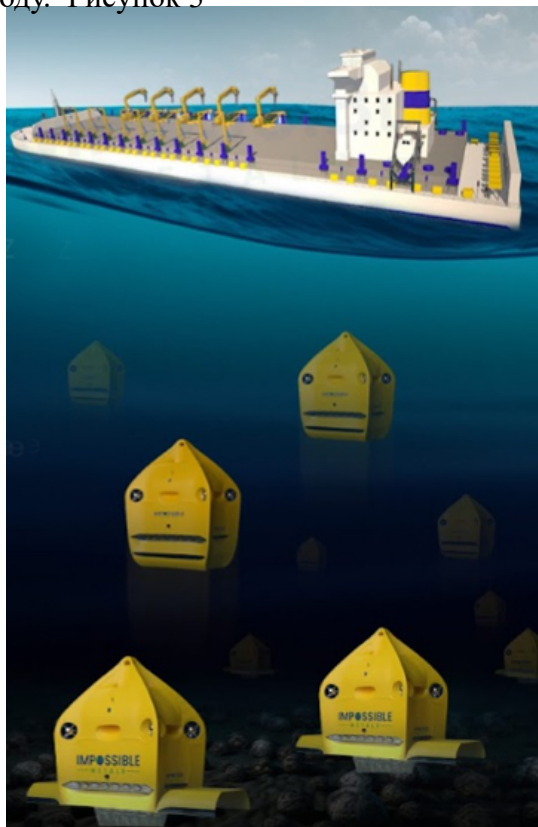


Рис. 3 Схема добычи конкреций компании Impossible Metals

(<https://impossiblemetals.com/>)

К основным преимуществам этой системы можно отнести:

- низкое воздействие на окружающую среду — предотвращение гибели конкреционной фауны, отсутствие значительного шлейфа (плюма), отсутствие сброса возвратных вод;

- масштабируемость — отсутствие единой точки отказа, возможность начать с низкой производительности и увеличивать ее с течением времени.

Компания ООО «ГИКО» (Россия) [3] Компания ООО «ГИКО» (Россия)

разрабатывает систему «роя» автономных роботов-сборщиков рассматривая ее как перспективный вариант добычи конкреций, обеспечивающий, что очень важно, минимальное влияние на окружающую среду. Проект по добыче предполагает использовать на глубине до 5000 м специальных роботов сборщиков ЖМК, составляющих рой. Роботы-сборщики доставляются на дно в специальном контейнере-улье, вместимость которого 512 штук (Рисунок 4). После того, как группа роботов-разведчиков разметит границы участка сбора добычи, роботы-сборщики приступают к непосредственному сбору конкреций. После заполнения индивидуального резервуара роботы-сборщики самостоятельно отправляются к базовому контейнеру-накопителю для перегрузки добытого материала и возвращаются к добыче железомарганцевых конкреций (Рисунок 5). Работа роботов, входящих в рой, полностью автономна, даже если у одного из них заканчивается заряд аккумуляторной батареи, он в автоматическом режиме отправляется на подзарядку к центральному контейнеру-улью. Оператору остается следить за наполняемостью контейнера добычи или реагировать на аварийные сигналы роботов-сборщиков. При выходе робота из строя он самостоятельно поднимается на поверхность воды.

Роботы-сборщики передвигаются в толще воды при помощи плавников на сервоприводе подобно «каракатице», что позволит осуществлять добычу наиболее экологичным способом:

- без давления на поверхность и нарушений донных осадков;
- без образования облаков взвеси (придонных плюмов);
- без изъятия 100 процентов твердого субстрата (предполагается, что небольшое количество конкреций будет оставаться на морском дне и, следовательно, послужит источником реколонизации для прикрепленной фауны);
- без образования плюмов вследствие сброса вод после первичной обработки конкреций на борту судна.

Таким образом, создание системы добычи конкреций с использованием роя роботов-сборщиков является инновационным инструментом осознанного будущего.

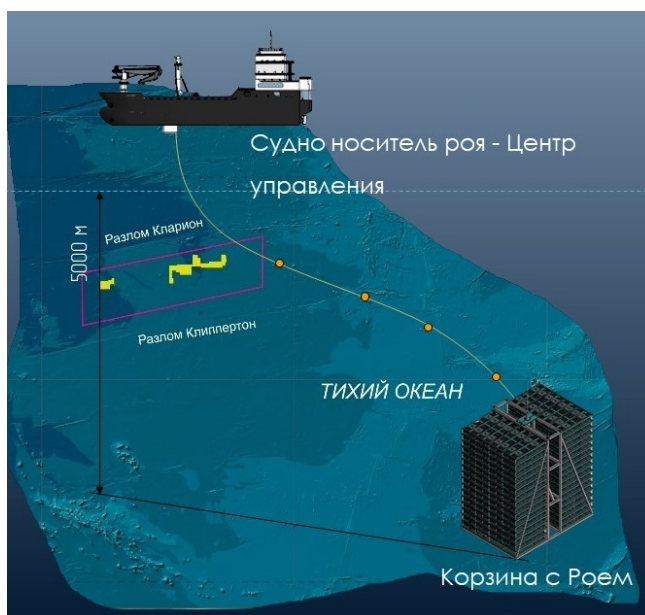


Рис. 4 Схема добычи конкреций компании ГИКО



Рис. 5. Схема отработки участка конкреций компании ГИКО

Создание подобных автономных систем, работающих в сложных условиях, сопряжено с рядом вызовов:

- детекция конкреций и определение расстояний до них;
- ориентирование в придонной области, подплытие и захват конкреции;
- сбор и транспортировка конкреций в подводный контейнер-накопитель;
- подъем собранных конкреций на судно-носитель;
- подводная навигация роя на участке работ;

- подводный обмен данными.

Разработка компьютерного зрения является важнейшей задачей при создании добычной системы с использованием роботов-сборщиков. Система должна идентифицировать конкрецию, определить ее размеры и расстояние до нее. (Рисунок 6) Нейронная сеть должна будет определить только конкреции и проигнорировать все другие объекты на морском дне. Предлагается оснастить робот сборщик двумя или тремя видеокамерами, что позволит определять не только расстояние до объектов относительно робота, но и управлять манипуляторами сборщика для взятия конкреции.

Задачи, стоящие при создании систем компьютерного зрения

1. Создать модель стерео/тринокулярного зрения (3d реконструкция пространства).
2. Идентификация объектов.
3. Определение расстояний до конкреций.

При сканировании изображения система машинного обучения должна будет определить и разметить все имеющиеся на дне объекты. Для этого на первом этапе необходимо обучить нейронную сеть на наборе изображений конкреций, представителей донной флоры и фауны.

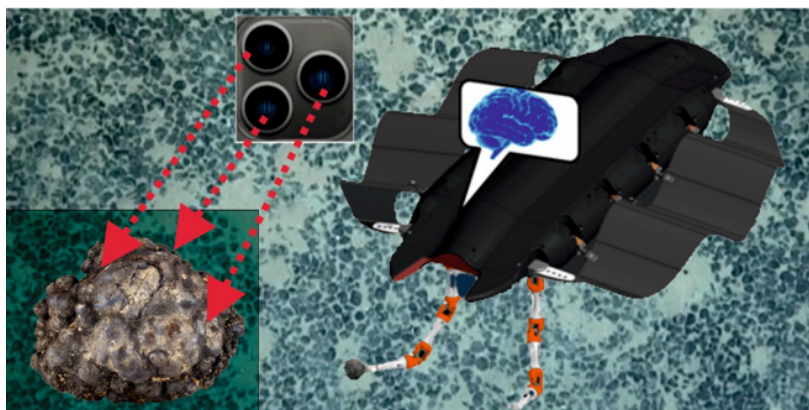


Рис. 6 Схема идентификации конкреций

Для решения задачи - самостоятельного перемещения роботов-сборщиков, захвата конкреций и отправки их в бункер робота предполагается создать нейронную сеть и обучить робота методом обучения с подкреплением. Таким образом, робот сам научится выполнять перемещения и движения манипуляторами наиболее оптимальным способом. При этом, компьютерное зрение будет предоставлять исходную информацию по местоположению конкреций.

Специалистами ООО ГИКО уже разработана схема комплекса для проведения добычных работ, создана компьютерная модель робота сборщика, изготовлен макет, отработаны элементы движения, определена грузоподъемная сила и необходимое энергообеспечение, ведется разработка системы управления движениями. На текущий момент проводятся

работы по созданию физической модели сборщика, который будет испытан в условиях, имитирующих реальные в искусственном бассейне с конкрециями. На завершающем этапе находится разработка компьютерного зрения работа на базе технологий искусственного интеллекта, которое будет обеспечивать распознавание и сбор конкреций на морском дне. (Рисунок 7) На рисунке слева показан макет робота сборщика, справа приведены результаты идентификации конкреций.



Рис. 7 Макет робота-сборщика и результаты распознавания конкреций.

Важнейшим компонентом комплекса по добыче конкреций является обеспечение подъема их на судно поддержки производства. Для этого ООО «ГИКО» совместно с ФГБУ «ВНИИОкеангеология» и Санкт Петербургским горным Университетом (СПГУ) прорабатывают способ подъема с использованием контейнеров и лебедочных подъемников.



Рис. 8 Система подъема конкреций

Как уже отмечалось выше, роботы будут отгружать собранные конкреции в накопительный контейнер, расположенный на дне. После его наполнения планируется

использовать разработанную в СПГУ (проф. А.Д. Юнгмейстер) платформу захвата контейнера, снабженную подруливающими устройствами и поднимать руду на судно поддержки производства корабельными лебедками. (Рисунок 8). Данная разработка обеспечивает подъем контейнера с минимальными временными затратами, чтобы обеспечить рентабельную производительность.

Выводы

На сегодняшний день наиболее популярная среди подрядчиков МОМД схема глубоководной добычи полезных ископаемых (конкреций) предполагает использование многотонных машин-сборщиков, работа которых приводит не только к нарушениям поверхности морского дна и непосредственному повреждению живых организмов, но и к образованию и распространению придонных плюмов – шлейфов донных отложений. Плюмы также будут образовываться и в водной толще вследствие сброса отработанных вод после первичной обработки конкреций на борту судна. Все это будет иметь крайне губительные последствия для окружающей среды и населяющих ее живых организмов.

Разработка экологически привлекательной добычной техники для сбора конкреций становится особенно актуальной на фоне все чаще раздающихся в мировом сообществе призывов заморозить все проекты по разработке ТПИ на дне океана.

К основным преимуществам добычных систем с использованием плавучих роботов-сборщиков можно отнести:

- низкое воздействие на окружающую среду (отсутствие непосредственного воздействия на поверхность донных осадков и обитающие в них живые организмы, отсутствие придонных плюмов, отсутствие сбросов возвратных вод, сохранение части твердого субстрата с прикреплённой фауной на морском дне), что соответствует задачам устойчивой морской экономики;

- масштабируемость — отсутствие единой точки отказа, возможность начать с низкой производительности и увеличивать ее с течением времени.

- технологичность – конвейерное производство роботов снижает стоимость одной особи. При выходе из строя робота, он просто заменяется на другой.

Таким образом, успешная реализация проектов по разработке экологически привлекательной добычной техники для сбора конкреций на морском дне может стать весомым вкладом в достижение целей Десятилетия ООН, посвященного науке об океане в интересах устойчивого развития.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сайт компании TMC, <https://metals.co/>
2. Сайт компании Impossible metals,
<https://docs.google.com/presentation/d/1FloilKqMmyJBIQonkXLdjV-QCvzBG4p4fmPJqoJoyc/edit?usp=sharing>
3. Сайт компании ООО «ГИКО», <https://ocean-minerals.ru/>

DEVELOPMENT OF DEEP-SEA MINING TECHNOLOGIES TAKING INTO ACCOUNT ENVIRONMENTAL PROTECTION REQUIREMENTS

S. Petukhov¹, A. Grigorchuk², L. Ermakova¹

¹ Saint-Petersburg, FSBI "VNIIOkeangeologia", Petukhov@vniio.ru

² Saint-Petersburg, HYCO Ltd, hycomarine@gmail.com,

The article is devoted to the issues of deep-sea mining on the seabed and related problems of environmental protection. Both traditional mining complexes, including self-propelled tracked collectors and innovative ones using robots-collectors are considered. Mining systems, including autonomous robotic collectors gliding above the seabed, cause minimal harm to the integrity of the deep ocean ecosystem. The development of environmentally attractive mining equipment for collecting nodules is an urgent task amid constant calls to freeze all projects for the exploitation of deep-sea minerals.

Key words: deep-sea mining, collectors, nodules, International Seabed Authority, environmental protection, plume, buoyant robots