

СРАВНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ПРИРОДНУЮ СРЕДУ, ОКАЗЫВАЕМОГО ГРУППОЙ РОБОТОВ-СБОРЩИКОВ И ДОБЫЧНОЙ МАШИНОЙ ПРИ ОСВОЕНИИ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ В ТИХОМ ОКЕАНЕ

Н.Ю. Свинцов

Владивостокский государственный университет, Владивосток, Россия,
e-mail: nikitakorolev92@mail.ru

Аннотация: Проведена оценка экологических последствий глубоководной добычи полезных ископаемых, в частности железомарганцевых конкреций (ЖМК), в Тихом океане. В условиях растущего спроса на металлы и истощения наземных месторождений освоение океанических ресурсов становится все более привлекательным, однако сопряжено с серьезными рисками для хрупких глубоководных экосистем. Исследование проводит сравнительный анализ двух принципиально различных технологических подходов: применения традиционной тяжелой добычной машины и инновационной системы «Рой» на основе автономных роботов-сборщиков отечественной компании ООО «ГИКО». Методология исследования основана на комплексной оценке воздействия по трем ключевым критериям: физическому, химическому и биологическому. В качестве района исследования выбрана зона Кларион-Клиппертон – наиболее изученный регион залегания ЖМК, характеризующийся уникальной и уязвимой биотой с высокой степенью эндемизма. Результаты проведенного анализа убедительно демонстрируют существенное экологическое превосходство технологии «Рой». На основании полученных данных сделан вывод, что переход на роботизированные технологии добычи является необходимым условием для устойчивого освоения минеральных ресурсов Мирового океана. Сформулированы практические рекомендации для разработчиков технологий и регулирующих органов, а также определяются перспективные направления дальнейших исследований, связанные с интеграцией искусственного интеллекта и созданием цифровых моделей для прогнозирования экологических последствий.

Ключевые слова: анализ воздействия на окружающую природную среду, глубоководная машина для добычи ЖМК, роботы-сборщики, глубоководная добыча ЖМК, добыча твердых полезных ископаемых в океане, морские экосистемы, распространение плюма взвешенных веществ.

Для цитирования: Свинцов Н.Ю. Сравнение воздействия на окружающую природную среду, оказываемого группой роботов-сборщиков и добычной машиной при освоении железомарганцевых конкреций в Тихом океане // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12. – С. 102–118. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_102.

Environmental impact of robotic miners and mining vehicle in mining of manganese nodules in the Pacific Ocean

N.Yu. Svintsov

Vladivostok State University, Vladivostok, Russia, e-mail: nikitakorolev92@mail.ru

Abstract: The ecological consequences of deep-sea mining of minerals, in particular, manganese nodules, in the Pacific Ocean are evaluated. In view of a growing demand for metals and due to depletion of ground surface mineral deposits, it becomes increasingly more attractive to develop oceanic resources, which however exposes a fragile deepwater ecosystem to high risk. The article analyzes and compares two exactly opposite approaches: conventional heavy mining vehicle and innovative system ROY of independent robotic miners manufactured by domestic company GIKO LLC. The research methodology performs an integrated evaluation of three key criteria: physical, chemical and biological. The test area is the Clarion–Clipperton Zone as the most explored area of manganese nodules, with a unique and vulnerable biota of a high-level endemism. The results decisively prove substantial ecological excellence of ROY technology. On the basis of the obtained data, a conclusion is drawn that transition to robotic mining technologies is an indispensable condition for sustainable development of mineral resources in the World Ocean. The practical guidelines are recommended for technology designers and regulatory bodies, and the promising areas of the further research are identified, connected with integration of artificial intelligence and digital modeling for forecasting of ecological consequences.

Key words: environmental impact analysis, deep-sea mining vehicle for manganese nodules, robotic miners, deep-sea mining of manganese nodules, solid mineral mining in ocean, marine ecosystems, suspended matter plume spreading.

For citation: Svintsov N. Yu. Environmental impact of robotic miners and mining vehicle in mining of manganese nodules in the Pacific Ocean. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12):102–118. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_12_0_102.

Введение

Современные технологии освоения минеральных ресурсов морского дна Тихого океана находятся на переломном этапе развития, когда традиционные методы добычи сталкиваются с растущими экологическими ограничениями и требованиями устойчивого природопользования [1]. Добычные машины, десятилетиями считавшиеся стандартом в отрасли, демонстрируют значительное негативное воздействие на морские экосистемы, что вызывает обоснованную озабоченность научного сообщества и природоохранных организаций. В этих условиях особую актуальность приоб-

ретает поиск альтернативных технологических решений, способных обеспечить экономически эффективную добычу при минимальном экологическом ущербе.

Альтернативным подходом к извлечению полезных ископаемых с морского дна является использование роя автономных роботов-сборщиков. В связи с этим, возникает необходимость сопоставления экологических последствий, вызванных их применением, с теми, что возникают при использовании традиционных добычных машин. Данное сравнение позволит оценить потенциальные преимущества и недостатки но-

вого метода с точки зрения охраны окружающей среды. Анализ должен учитывать различные факторы, такие как воздействие на донные экосистемы, образование взвеси, шумовое загрязнение и нарушение естественных процессов. Целью является выявление наиболее экологически безопасного способа разработки глубоководных минеральных ресурсов.

Цель исследования — сравнить экологические последствия двух технологий: рой автономных роботов-сборщиков (малогабаритные устройства, избирательно собирающие конкреции) и добычная машина (тяжелая техника, извлекающая породу с помощью гидравлики или механических захватов).

Характеристика района исследования для добычи ЖМК в Тихом океане

Для исследования была взята зона Кларион-Клиппертон в центральной части Тихого океана, данная зона является наиболее изученным районом залегания ЖМК (рис. 1).

Глубины здесь составляют 4000 — 6000 м, концентрация конкреций достигает 15 — 25 кг/м² (рис. 2). Донные отложения представлены преимущественно диатомовыми илами с высоким содержанием кремния (до 60%) и железа (5 — 10%). Гидрологические условия характеризуются слабыми придонными течениями (2 — 5 см/с) и низкой температурой воды (1 — 2 °С) [2].

Биота зоны Кларион-Клиппертон (ККЗ) отличается высокой степенью эндемизма, что обусловлено уникальными условиями этой глубоководной области Тихого океана. Экстремальное давление, низкие температуры и скудные ресурсы органического вещества создали среду, в которой сформировались специализированные виды, не встречающиеся больше нигде в мире. Среди доминирующих групп организмов выделяются голотурии, играющие ключевую роль в переработке детрита, а также стеклянные губки, образующие сложные структуры, которые служат укрытием для других глубоководных обитателей. Важное место в экосистеме



Рис. 1. Зона Кларион-Клиппертон: географическое положение

Fig. 1. Clarion-Clipperton Zone: geographic location

(https://dzen.ru/a/YIcl3zHX5QbA9yYp?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera)

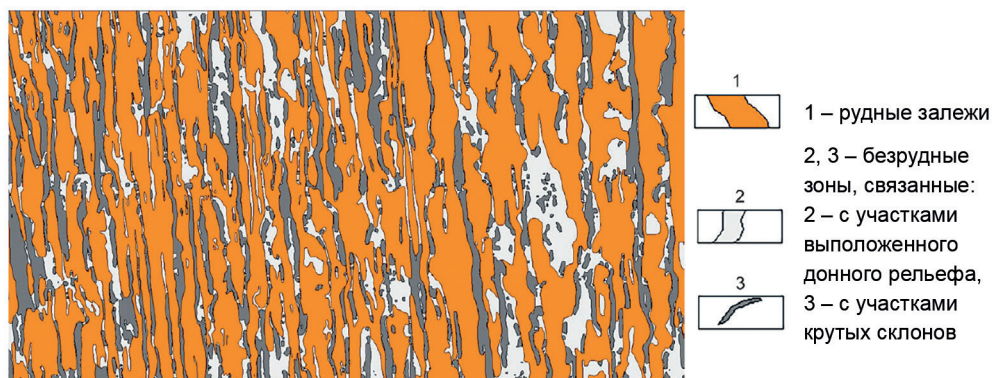


Рис. 2. Пример детально изученного участка месторождения полиметаллических конкреций в зоне Кларион-Клиппертон. Размер участка 84×46 км [2]

Fig. 2. An example of a thoroughly studied section of a polymetallic nodule deposit in the Clarion-Clipperton zone. The size of the section is 84×46 km [2]

занимают и полихеты — многощетинковые черви, участвующие в биотурбации донных отложений.

Плотность бентосных организмов в ККЗ крайне низкая и составляет всего 5—15 экземпляров на квадратный метр, что связано с ограниченным количеством доступной пищи [3]. Для сравнения, в более продуктивных зонах океана, таких как континентальный шельф, плотность бентоса в сотни раз выше.

Требования к технологии и оборудованию

для глубоководной добычи ЖМК

Международный орган по морскому дну (МОМД) устанавливает комплексные требования к технологиям глубоководной добычи железо-марганцевых конкреций (ЖМК), направленные на обеспечение экологической безопасности, технологической надежности и эффективности работ в международных водах. Основной акцент делается на минимизацию воздействия на морские экосистемы при соблюдении современных технических стандартов. Технологии должны соответствовать принципу использования наилучших доступных технологий, что подразумевает их постоянное совершенствование в соответствии

с последними научными разработками. Ключевым требованием является применение щадящих методов сбора конкреций, исключающих масштабное разрушение донных осадков — разрешены только гидравлические или механические коллекторы с минимальным взмучиванием осадка, при этом полностью запрещены разрушительные методы типа драгирования. Особое внимание уделяется селективности сбора, чтобы минимизировать попадание в систему глубоководных организмов и нецелевого материала [4, 5].

Для подъема конкреций на поверхность допускаются только герметичные системы (гидравлические эжекторные или ковшовые канатные), исключающие утечку взвешенных частиц в водную толщу. Обязательным требованием является энергоэффективность оборудования с минимальными выбросами. В части экологических требований особое значение придается контролю за образованием осадочных шлейфов — технологии должны либо полностью предотвращать их образование, либо минимизировать распространение взвеси за счет специальных барьеров или замкнутых систем очистки. Жестко регламентируется акустическое воздействие —

уровень шума, особенно в чувствительных для морских млекопитающих частотных диапазонах.

Системы мониторинга должны работать в режиме реального времени, отслеживая все ключевые параметры добычи (глубину, скорость сбора, состояние оборудования) и оперативно передавая данные в контролирующие органы. Предпочтение отдается полностью автоматизированным и роботизированным решениям с минимальным человеческим участием. Для всех технологических процессов обязательна разработка детальных аварийных протоколов на случай разрывов трубопроводов, потери связи или других нештатных ситуаций. Передпуском к коммерческой эксплуа-

тации все технологические решения проходят многоэтапные испытания в контролируемых условиях с обязательной независимой экспертизой МОМД [6, 7].

Перспективными направлениями считаются разработка полностью автономных роботизированных систем с искусственным интеллектом для оптимизации маршрутов сбора, создание замкнутых систем подъема с нулевым воздействием на водную среду, а также внедрение инновационных методов переработки конкреций непосредственно на дне. Все технологические решения должны сопровождаться комплексными экологическими оценками, включающими моделирование долгосрочных последствий для глубоководных экосистем.



Рис. 3. Комплекс добычи на основе глубоководной машины для сбора ЖМК

Fig. 3. A mining complex based on a deep-sea machine for collecting iron ore

Технология глубоководной добычи ЖМК с помощью добычной машины

Добычной комплекс для извлечения железомарганцевых конкреций из глубоководных месторождений включает в себя три ключевых компонента [8]. Центральным элементом выступает специализированное судно, обеспечивающее координацию всего процесса добычи.

Вторым важным компонентом является транспортная система, отвечающая за подъем добытой рудной массы с океанского дна на поверхность. Эта система обеспечивает непрерывную подачу добытого материала.

Третьим неотъемлемым элементом служит глубоководное добычное оборудование, непосредственно осуществляющее сбор железомарганцевых конкреций со дна водоема. Именно этот компонент выполняет первичную стадию добычи полезных ископаемых.

Все три компонента работают в единой технологической цепочке, обеспечивая эффективную добычу и транспортировку ЖМК с больших глубин (см. рис. 3).

Метод добычи ЖМК с помощью добычной машины характеризуется следующими негативными экологическими последствиями:

- Уничтожение донной фауны. Добычная машина разрушает среду обитания и уничтожает донную фауну в зоне сбора конкреций.
- Образование донного шлейфа. Поднятый со дна осадок образует шлейф мути, который распространяется на значительные расстояния, негативно влияя на гидробионтов, фильтрующих воду.
- Нарушение химического состава придонного слоя. Высвобождение питательных веществ и токсичных веществ из осадка может приводить к изменениям в химическом составе воды и донных отложений.

- Шум и вибрация. Работа добычной машины создает шум и вибрацию, которые могут оказывать негативное воздействие на поведение морских животных.

Технология глубоководной добычи ЖМК с помощью группы роботов-сборщиков

На данный момент существует несколько разновидностей роботов-сборщиков с помощью которым планируется осваивать глубоководные месторождения ЖМК. В данной статье мы рассмотрим отечественную систему «Рой», которую разрабатывает компания ООО «ГИКО».

Система предназначена для работы на глубинах до 5000 – 5500 м.

В состав системы входят судноноситель, подъемно-транспортное судно, роботы-разведчики, роботы-сборщики (см. рис. 4), система подводной навигации, специальная корзина для размещения роботов и контейнеры для сбора и подъема ЖМК.

Принцип работы системы следующий: корзина с 512 роботами-сборщиками опускается на дно океана (см. рис. 5). Роботы-разведчики устанавливают навигационные маяки и размечают границы участка добычи (см. рис. 6). Центр управления на судне через оптический кабель передает задания роботам-сборщикам, которые включают координаты участков работ, их характеристики и планируемые объемы добычи.

Роботы-сборщики, оснащенные манипуляторами, собирают ЖМК в индивидуальные бункеры и переносят их в специальные контейнеры. После заполнения бункера робот самостоятельно отправляется к контейнерам для разгрузки и возвращается к добыче. При разряде аккумуляторов робот автоматически направляется на подзарядку к центральному контейнеру. В случае по-



Рис. 4. Робот-сборщик разработки ООО ГИКО (ГИКО — глубоководная добыча..., 2023)

Fig. 4. Robot-assembler developed by GIKO LLC (GIKO — deep-sea mining..., 2023)
(<https://ocean-minerals.ru/page/roi-glubokovodnyh-robotov.php>)

ломки робот либо самостоятельно поднимается на поверхность, либо транспортируется служебными роботами в контейнер для подъема на судно [9, 22]. Роботы передвигаются в толще воды с помощью плавников, работающих по

принципу движения каракатицы. Это позволяет не нарушать поверхность грунта и не поднимать облака взвеси, которые могут негативно повлиять на местную флору и фауну. Для распознавания конкреций используется система ком-

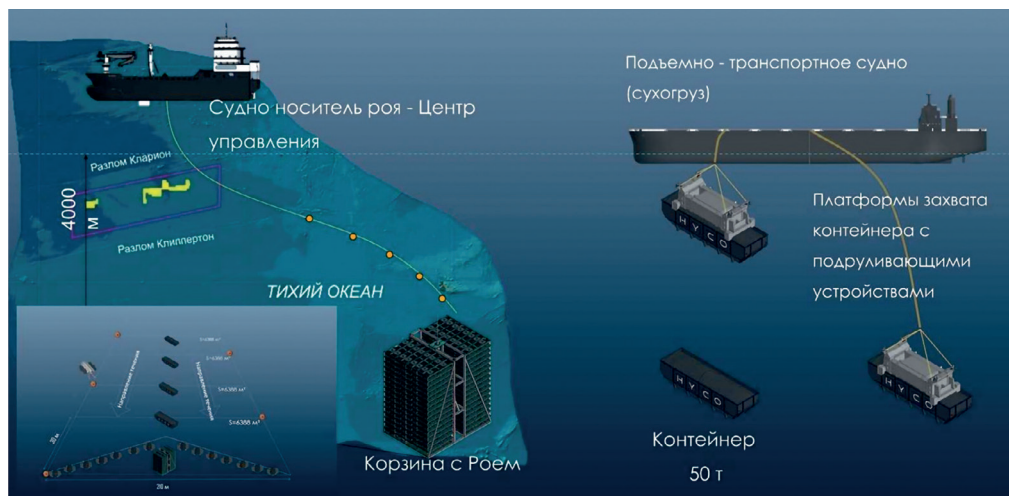


Рис. 5. Общая схема глубоководной добычи ЖМК с помощью роботов-сборщиков «Рой» разработки ООО ГИКО (ГИКО — глубоководная добыча..., 2023)

Fig. 5. General scheme of deep-sea mining of iron ore using the "Roy" robotic collectors developed by GIKO LLC (GIKO — deep-sea mining..., 2023)
(<https://ocean-minerals.ru/page/roi-glubokovodnyh-robotov.php>)

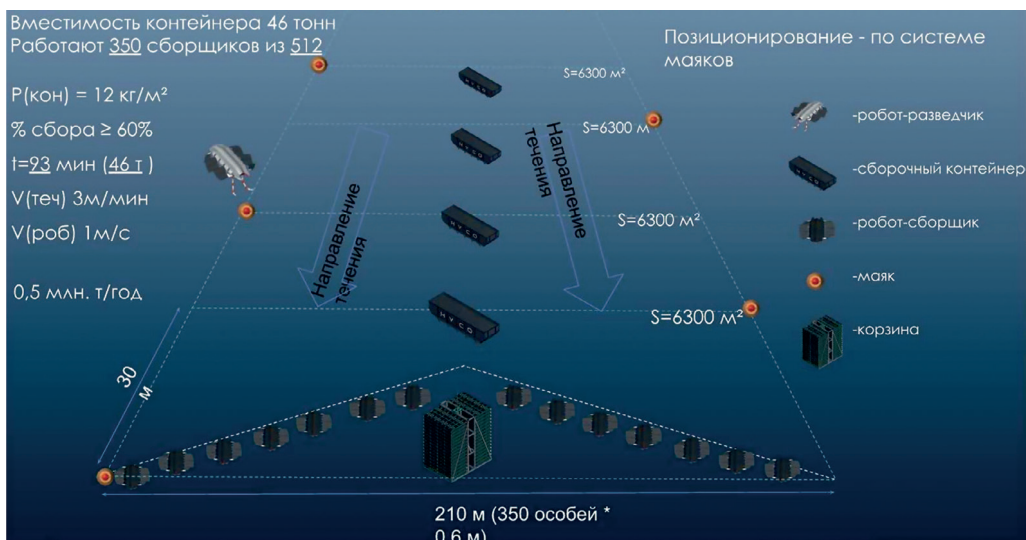


Рис. 6. Схема участка работ глубоководной добычи ЖМК с помощью роботов-сборщиков «Рой» разработки ООО ГИКО (ГИКО — глубоководная добыча..., 2023)

Fig. 6. Layout of the deep-sea mining site for iron ore using the Roy robotic collectors developed by GIKO LLC (GIKO — deep-sea mining..., 2023)

(<https://ocean-minerals.ru/page/roi-glubokovodnyh-robotov.php>)

пьютерного зрения на базе искусственного интеллекта [10].

Механическое воздействие на морское дно сведено к минимуму благодаря особенностям конструкции роботов. Использование плавников, работающих по принципу движения каракатицы, исключает поднятие донных отложений и нарушение целостности грунта. Роботы работают в строго обозначенных участках, что позволяет контролировать зону воздействия.

Химическое загрязнение практически исключено благодаря следующим факторам:

- Полная герметичность всех механизмов;
- Использование экологически безопасных материалов корпуса;
- Отсутствие необходимости в химических реагентах при добыче;
- Защита систем от попадания морской воды.
- Биологическое влияние на морские экосистемы минимизировано за счет:

- Точечного сбора ЖМК без нарушения естественных мест обитания;
- Работы роботов в бесшумном режиме;
- Системы навигации, позволяющей избегать зон скопления морских животных;
- Контролируемого перемещения роботов по заранее заданным маршрутам.

Сравнение воздействия на окружающую природную среду, оказываемого группой роботов-сборщиков и добычной машиной при освоении ЖМК в Тихом океане

Методология оценки воздействия на морскую экосистему базируется на системном подходе, учитывающем специфику глубоководной среды и особенности различных технологий добычи. Основными принципами методологии являются объективность и достоверность получаемых данных, комплексный характер исследований, учет специфики

глубоководной среды, а также возможность сравнения различных технологий добычи.

Для проведения сравнительного анализа воздействия на окружающую среду были выделены три группы критериев:

1. Физическое воздействие: площадь, глубина нарушения донных отложений и объем поднятых взвешенных веществ (ВВ).

2. Химическое воздействие: изменение параметров водной среды (кислород, pH, концентрация металлов).

3. Биологическое воздействие: смертность бентоса, шумовое загрязнение, время восстановления.

Такой многокритериальный подход позволит провести объективное сравнение различных технологий добычи и разработать научно обоснованные рекомендации по минимизации негативного воздействия на морскую экосистему при освоении глубоководных месторождений Тихого океана.

Основываясь на научные исследования, лабораторные и опытно-промышленные испытания [11 – 15] было определено воздействие на окружающую природную среду по трем группам критериев. Далее подробнее рассмотрим каждую группу критериев применительно к технологиям глубоководной добычи ЖМК с помощью группы робо-

тов-сборщиков и добычной машины. Физическое воздействие глубоководной добычи — ключевой экологический риск, напрямую влияющий на хрупкие донные экосистемы. Оно приводит к необратимому разрушению тысячелетних осадочных слоев, гибели эндемичных организмов и долгосрочным изменениям в структуре морского дна.

Особую опасность представляют плюмы ВВ, которые могут распространяться на километры и приводить к гибели фильтрующих животных, нарушая пищевые цепи.

Роботы-сборщики оказывают минимальное физическое воздействие на морское дно благодаря точечному сбору с использованием манипуляторов (см. рис. 7). Глубина проникновения не превышает 5 см, что позволяет избирательно извлекать только поверхностный слой с железомарганцевыми конкрециями, не затрагивая глубинные отложения. Объем поднимаемых осадков крайне мал — от 0,01 до 0,1 м³/ч, а образующиеся при этом локальные шлейфы быстро оседают, практически не распространяясь за пределы рабочей зоны. Особого внимания заслуживает инновационная технология парения, при помощи плавников,двигающихся подобно плавникам каракатицы, которая минимизирует механический контакт с дном и значительно снижает турбулентное воздействие

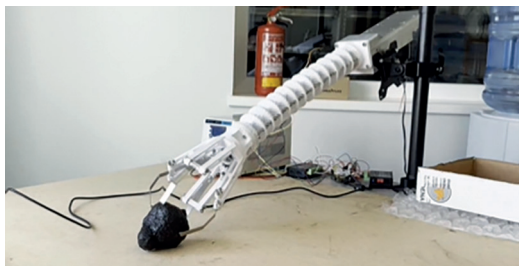


Рис. 7. Манипулятор робота-сборщика для сбора ЖМК разработки ООО ГИКО (ГИКО — глубоководная добыча..., 2023)

Fig. 7. Robotic arm for collecting iron ore developed by GIKO LLC (GIKO — deep-sea mining..., 2023) (<https://ocean-minerals.ru/page/roi-glubokovodnyh-robotov.php>)

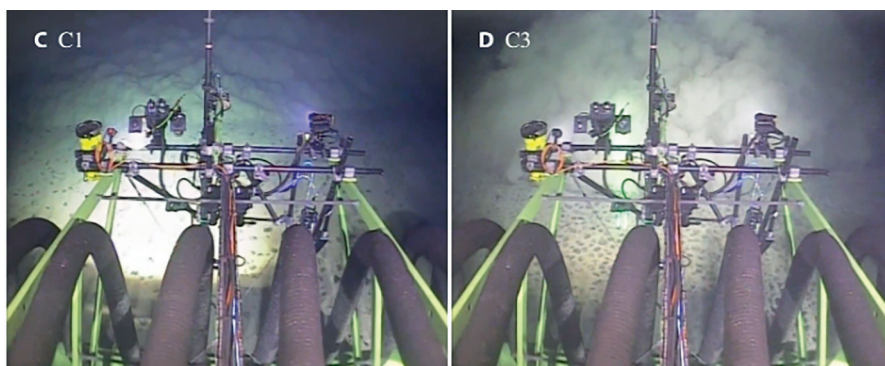


Рис. 8. Снимки с фронтальной камеры добычной машины в процессе сбора ЖМК с морского дна в Тихом океане

Fig. 8. Images from the front camera of a mining machine during the process of collecting iron ore from the seabed in the Pacific Ocean

(<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abn1219>)

на придонные слои. Такой подход обеспечивает высокую точность операций при максимальном сохранении целостности донных экосистем.

Добычные машины оказывают значительное механическое воздействие на морское дно, что подтверждается исследованиями [12, 13]. По данным Международного органа по морскому дну [8], за один проход современные добычные машины нарушают площадь от 100 до 1000 м². Широкий диапазон нарушаемой площади объясняется совокупностью технологических и природных факторов:

1. Конструктивными различиями добычных машин — шириной рабочего органа (2–6 м), типом воздействия на грунт (механическое рыхление/вакуумный забор) и глубиной проникновения в осадочный слой (0,1–0,5 м);

2. Динамикой образования плюма взвешенных веществ (ВВ), включая первичный плюм при движении машины, вторичный плюм при сбросе обогащенной пульпы и трансформацию ВВ под влиянием придонных течений;

3. Вариативностью природных условий — гранулометрическим составом осадков, глубиной морского дна и био-

геохимическими характеристиками придонной среды. Особенно значительный вклад в расширение зоны воздействия вносят процессы ресуспензии при сбросе хвостов с добычного судна, увеличивающие первоначальную площадь нарушения в 1,5–3 раза согласно данным мониторинга DISCOL [16].

Согласно мониторингу, проведенному во время испытаний добычной системы Nodule Collector System (NCS) (рис. 8) в зоне Клариян-Клиппертон Тихого океана в 2022 г., компанией The Metals Company (TMC), объем поднимаемых осадков составил 50–500 м³/ч [17].

Подъем ЖМК на судно по трубопроводу происходит вместе с значительным объемом жидких отходов в виде пульпы, содержащей взвешенные частицы. Согласно исследованиям The Metals Company [18], переработка всего 1 т ЖМК приводит к образованию 3–5 т жидких отходов. При сбросе этой пульпы обратно в океан формируются вторичные осадочные шлейфы, которые представляют серьезную экологическую угрозу. Эти шлейфы, переносимые океаническими течениями, могут распространяться на десятки километров от

места сброса, оказывая негативное воздействие на морские экосистемы. Попадая в придонные слои, взвешенные частицы оседают на бентосные сообщества, буквально погребая под собой хрупкие глубоководные организмы, включая губки и кораллы. Кроме того, эти шлейфы вызывают изменения химического состава воды — повышают концентрацию растворенных металлов и снижают уровень кислорода, что может привести к образованию локальных мертвых зон. Особую опасность представляет долгосрочное воздействие этих частиц, которые, по данным мониторинга, могут оставаться во взвешенном состоянии до нескольких месяцев, постепенно оседая на обширных территориях и нарушая естественные процессы в глубоководных экосистемах [19].

Химическое воздействие при добыче ЖМК в глубоководных районах Тихого океана связано с изменением состава воды и донных отложений. Оно может быть прямым (из-за выброса загрязняющих веществ) или косвенным (из-за нарушения естественных химических процессов).

Основными источниками химического загрязнения являются процессы взмучивания донных осадков при добычных операциях и возможные техногенные выбросы. При механическом воздействии на донные отложения происходит высвобождение тяжелых металлов (таких как медь, свинец, ртуть и кадмий), которые аккумулированы в полиметаллических конкрециях и кобальтоносных корках. Также в осадках могут содержаться сульфидные соединения и метан, характерные для гидротермальных систем и зон холодного просачивания. Дополнительным фактором риска выступают органические токсины, включая полициклические ароматические углеводороды и пестициды, способные накапливаться в донных от-

ложениях. Техногенные выбросы включают потенциальные утечки гидравлических жидкостей, топлива и реагентов, используемых в процессах обогащения руды.

Ключевыми параметрами водной среды, подверженными изменениям при глубоководной добыче, являются концентрация растворенного кислорода, уровень кислотности (pH) и содержание тяжелых металлов. Снижение концентрации кислорода происходит вследствие двух основных процессов: бактериального разложения органического вещества в поднятых осадках и химического окисления сульфидных минералов. Эти процессы могут приводить к развитию гипоксических условий, что представляет серьезную угрозу для донных сообществ и пелагических организмов. Изменение кислотно-щелочного баланса воды преимущественно связано с процессами окисления сульфидов, сопровождающимися выделением ионов водорода, что приводит к заметному закислению придонного слоя воды. Это, в свою очередь, влияет на способность морских организмов к кальцификации и повышает биодоступность токсичных металлов.

Добычные машины, оказывают выраженное химическое воздействие за счет масштабного нарушения донных отложений. При их работе происходит интенсивное взмучивание осадочного слоя, приводящее к выбросу в водную толщу тяжелых металлов (меди, свинца, ртути и кадмия), содержащихся в полиметаллических конкрециях. Одновременно из глубинных слоев осадков высвобождаются сульфидные соединения и метан, что вызывает цепь химических реакций. Процессы окисления этих веществ приводят к резкому снижению содержания растворенного кислорода (на 30 — 50% от исходного уровня) и заметному закислению воды (падению pH

на 0,5–1,5 единицы). Образующиеся при этом плюмы взвешенных частиц с повышенным содержанием металлов могут распространяться на значительные расстояния, создавая зону химического загрязнения [20].

В отличие от этого, роботы-сборщики с манипуляторами демонстрируют принципиально иной характер воздействия благодаря своей селективности и точности работы. Их конструкция позволяет извлекать конкреции, минимально затрагивая окружающие донные отложения. В результате объем взмучиваемых частиц сокращается в 5–10 раз по сравнению с традиционными добычными машинами. Соответственно, выброс тяжелых металлов в водную среду оказывается значительно меньшим (превышение фоновых концентраций всего в 2–5 раз против 15–25 раз при использовании добычных машин). Изменения кислородного режима и кислотно-щелочного баланса также выражены слабее: содержание O_2 снижается не более чем на 10–15%, а колебания pH не превышают $\pm 0,2$ единицы. Важным преимуществом роботизированных систем является и значительно более быстрое восстановление исходных химических параметров среды — если после работы добычных машин на нормализацию ситуации требуются месяцы, то при использовании роботов-сборщиков окружающая природная среда восстанавливается за несколько недель.

Биологическое воздействие глубоководной добычи ЖМК существенно различается в зависимости от применяемой технологии. При использовании добычных машин с гидравлической системой подъема наблюдается комплексное негативное влияние на морские экосистемы, в то время как роботы-сборщики с манипуляторами демонстрируют значительно более щадящее воздействие.

В процессе работы добычные машины полностью разрушают поверхностный слой донных отложений на площади от 100 до 1000 м² за один проход, что приводит к практически полному уничтожению бентосных сообществ в зоне воздействия. Особенно страдают долгоживущие и медленно восстанавливающиеся организмы — глубоководные кораллы, губки и полихеты, многие из которых являются эндемиками конкретных районов морского дна. Образующиеся при работе таких систем плюмы взвешенных частиц распространяются на значительные расстояния, вызывая вторичные негативные эффекты. Мелкодисперсные частицы забивают фильтрующий аппарат двустворчатых моллюсков и асцидий, что приводит к их массовой гибели. Одновременно происходит снижение продуктивности хемосинтетических сообществ, связанное с изменением химического состава придонного слоя воды. Акустическое загрязнение от работающего оборудования (120–200 дБ) нарушает естественные коммуникационные каналы морских млекопитающих и вызывает изменения в поведении рыб. Результаты мониторинга в зоне Кларион-Клиппертон Тихого океана показали, что после месяца работы добычной машины происходит снижение численности бентосных организмов на 78%, при этом 12 эндемичных видов полностью исчезают из зоны воздействия [21].

В отличие от этого, группа роботов-сборщиков характеризуются точечным и контролируемым воздействием на окружающую среду. Благодаря высокому управлению и компьютерному зрению эти устройства способны избирательно извлекать конкреции, минимально затрагивая донные отложения. Сохранность бентосных сообществ достигает 85–90%, а смертность организмов ограничивается зоной обитания

Сравнение воздействия на окружающую природную среду, оказываемого группой роботов-сборщиков и добычной машиной при освоении ЖМК в Тихом океане
A comparison of the environmental impacts of a group of robotic collectors and a mining machine during iron ore mining in the Pacific Ocean.

Параметр	Роботы-сборщики	Добычная машина
Физическое воздействие		
Относительная площадь нарушения (площадь воздействия/общая площадь работ)	0,05 – 0,15 (5 – 15%)	0,8 – 1,0 (80 – 100%)
Глубина нарушения донных отложений	0–5 см (поверхностный сбор, минимальное нарушение грунта)	10–40 см (глубокое снятие грунта)
Объем поднятых осадков с морского дна	0,01–0,1 м ³ /ч (локальные плюмы ВВ, быстро оседают)	50–500 м ³ /ч (масштабные плюмы ВВ)
Объем сброса хвостов с судна	500 – 1000 м ³ /сут	(сброс хвостов отсутствует)
Химическое воздействие		
Изменение содержания кислорода	снижение < 0,1 мг/л, локально	снижение 0,5–2 мг/л в радиусе 1–5 км
Изменение pH	±0,01–0,05 единиц	снижение на 0,1–0,3 единицы в зоне плюмов
Концентрация металлов в воде	< 0,01 мг/л (Fe, Mn, Ni)	0,05–0,2 мг/л (Fe, Mn, Ni)
Биологическое воздействие		
Смертность бентоса	5–20% в зоне сбора (локальное воздействие)	80–95% в зоне добычи (масштабное разрушение)
Шумовое загрязнение	50–70 дБ (электродвигатели)	100–140 дБ (гидравлические системы)
Время восстановления биоты	1 – 5 лет	20 – 50 лет

на самих конкрециях. Отсутствие масштабного взмучивания осадков предотвращает образование протяженных плюмов взвеси, что обеспечивает нормальные условия существования для фильтрующих организмов. Уровень шумового загрязнения (70 – 90 дБ) сопоставим с естественными акустическими фонами и не оказывает существенного влияния на морских обитателей [9, 10, 22].

На основе выше рассмотренных групп критериев воздействия на окружающую природную среду при глубоководной добыче ЖМК в Тихом океане составлена сравнительная таблица.

Заключение

Сравнительный анализ технологий глубоководной добычи ЖМК в Тихом океане убедительно доказал, что группа роботов-сборщиков с манипуляторами обладают существенными экологическими преимуществами перед традиционными добычными машинами. По всем оцениваемым параметрам — физическому, химическому и биологическому воздействию — роботизированные технологии демонстрируют значительно меньший экологический след.

Основные результаты исследования показывают, что использование робо-

тов-сборщиков позволяет сократить площадь нарушения донных отложений с 80–100% до 5–15% рабочей зоны, уменьшить выбросы тяжелых металлов в 5–10 раз, а также снизить смертность бентосных организмов с 80–100% до 5–15%. Эти данные убедительно подтверждают первоначальную гипотезу о большей экологической безопасности группы роботов-сборщиков.

На основании полученных результатов предлагаются конкретные рекомендации для различных заинтересованных сторон. Разработчикам технологий следует сосредоточиться на совершенствовании систем компьютерного зрения и алгоритмов движения роботов-сборщиков, что позволит еще больше минимизировать их воздействие на донные экосистемы. Регулирующим органам рекомендуется разработать дифференцированные экологические стандарты для различных технологий добычи и рассмотреть возможность введения ограничений на использование добычных машин в особо уязвимых районах.

Перспективы дальнейшего развития технологий добычи ЖМК связаны с активным внедрением современных цифровых решений. Особый потенциал имеют технологии искусственного ин-

теллекта и машинного обучения, которые могут быть использованы для оптимизации маршрутов сбора конкреций, прогнозирования экологических последствий и автоматического распознавания биологических объектов. Дополнительные возможности открывает разработка новых материалов, снижающих шумовое воздействие, а также создание цифровых двойников месторождений для моделирования различных сценариев добычи.

В заключение следует подчеркнуть, что переход на экологически безопасные технологии глубоководной добычи, такие как роботы-сборщики, является необходимым условием для устойчивого освоения минеральных ресурсов Тихого океана. Реализация этого перехода потребует скоординированных усилий научного сообщества, разработчиков технологий и регулирующих органов.

Только комплексный подход, сочетающий современные научные знания, инновационные технические решения и эффективную систему экологического регулирования, позволит обеспечить баланс между экономическими интересами и сохранением хрупких глубоководных экосистем для будущих поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свинцов Н. Ю. Анализ возможного экологического воздействия при добыче железомарганцевых конкреций в рудной провинции Клариян-Клипертон Тихого океана // Научный аспект. — 2023. — Т. 29. — № 12. — С. 3670–3677.
2. Юбко В. М., Пономарева И. Н., Лыгина Т. И. Геологоразведочные работы на месторождении железомарганцевых конкреций в зоне Клариян-Клипертон Тихого океана: история и результаты исследований // Океанологические исследования. — 2023. — Т. 51. — № 4. — С. 90–134. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).5. EDN DKHNUY.
3. Адрианов А. В. Современные проблемы изучения морского биологического разнообразия // Биология моря. — 2015. — № 41(6). — С. 387–399. DOI: 10.1134/S1063074015060020.
4. План экологического обустройства для зоны Клариян-Клипертон (ISBA/17/LTC/7): офиц. сайт Международного органа по морскому дну. Текст : электрон. URL: https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/isba-17ltc-7_1_1.pdf (дата обращения: 07.07.2025).
5. Решение Совета Международного органа по морскому дну относительно поправок к Правилам поиска и разведки полиметаллических конкреций в Районе и смежных вопросах от 22.07.2013

(ISBA/19/C/17). Текст: электрон. URL: https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/isba-19c-17_1_1.pdf (дата обращения: 07.07.2025).

6. *Решение* Ассамблеи Международного органа по морскому дну относительно поправок к Правилам поиска и разведки полиметаллических конкреций в Районе от 25.07.2013 (ISBA/19/A/9). Текст: электрон. URL: https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/isba-19a-9_1_1.pdf (дата обращения: 07.07.2025).

7. *Руководящие рекомендации* контракторам по оценке возможного экологического воздействия разведки морских полезных ископаемых в Районе от 30.03.2020 (ISBA/25/LTC/6/Rev.1). Текст: электрон. URL: <https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/25ltc-6-rev1-ru.pdf> (дата обращения: 07.07.2025).

8. *Qi Zhang, Xuguang Chen, Lubao Luan, Xuanming Ding, Fei Sha, Xuelin Liu* Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives // *Earth Energy Science*. 2024, vol. 1, no. 1, pp. 65 – 84. DOI: 10.1016/j.ees.2024.08.002. EDN HEROVO.

9. ГИКО — глубоководная добыча полезных ископаемых на океанических шельфах не нарушающими экосистему методами. 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ocean-minerals.ru/page/dobycha-morskih-mineralov.php>; <https://ocean-minerals.ru/page/roi-glubokovodnyh-robotov.php> — свободный. Загл. с экрана. Яз. рус.

10. Юбко В. М., Пономарева И. Н., Лыгина Т. И. Современные тенденции развития техники и технологий разведки и добычи железомарганцевых конкреций и кобальтоносных железомарганцевых корок Мирового океана // *Океанологические исследования*. — 2023. — Т. 51. — № 4. — С. 186 – 215. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).8. EDN SRUNMO.

11. *Interoceanmetal Joint Organization. Benthic Impact Experiment (BIE): Technical and Environmental Results / Interoceanmetal Joint Organization*. Szczecin: IOM, 1998, 78 p. (IOM Technical Report ; No. 3).

12. *Global Sea Mineral Resources. Patania II Trials in the CCZ: Environmental Monitoring Results / Global Sea Mineral Resources*. Brussels : GSR, 2021, 64 p. : ill. (GSR Technical Report).

13. *Jones D. O. B., Kaiser S., Sweetman A. K.* Environmental impacts of deep-sea mining: A review of current knowledge and future challenges // *Oceanography*. 2017, vol. 30, no. 4, pp. 142 – 157.

14. *Peukert A., Schoening T., Alevizos E., Köser K., Kwasnitschka T., Greinert J.* Understanding Mn-nodule distribution and mining impacts using AUV data // *Biogeosciences*. 2018, vol. 15, no. 8, pp. 2525 – 2549. DOI: 10.5194/bg-15-2525-2018.

15. *China ocean mineral resources research and development association. Technical specifications for deep-sea tracked vehicles / COMRA*. Qingdao : COMRA Press, 2021, 112 p.

16. *Thiel H., Schriever G., Ahnert A., Bluhm H., Borowski C., Vopel K.* The DISCOL experiment: Long-term effects of simulated manganese nodule mining on the deep-sea benthos // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2001, vol. 48, no. 17-18, pp. 3749 – 3760. DOI: 10.1016/S0967-0645(01)00053-6.

17. *Miller K. A., Thompson K. F., Johnston P., Santillo D.* Sediment plume dynamics during nodule collection tests in the Clarion-Clipperton Zone. *Marine Pollution Bulletin*. 2023, vol. 186, article 114426. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114426.

18. *Peukert A., Schoening T., Alevizos E., Köser K., Kwasnitschka T., Greinert J.* An in situ study of abyssal turbidity-current sediment plumes generated by a deep seabed polymetallic nodule mining preprototype collector vehicle // *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 4770. DOI: 10.1038/s41598-022-08506-4.

19. Свинцов Н. Ю., Васянович Ю. А. Воздействие на окружающую природную среду распространения пелюма взвешенных частиц в водной толще при глубоководной добыче ЖМК в провинции Клариян-Клиппертон Тихого океана // *Международный научноисследовательский журнал*. — 2024. — № 8(146). URL: <https://research-journal.org/archive/8-146-2024-august/10.60797/IRJ.2024.146.41> (дата обращения: 25.09.2024). DOI: 10.60797/IRJ.2024.146.41.

20. Свинцов Н. Ю., Васянович Ю. А., Кузнецов П. А. Комплексный мониторинг окружающей природной среды при геологоразведке и глубоководной добыче железо-марганцевых конкреций в провинции Клариян-Клиппертон Тихого океана // *Вопросы современной науки и практики*. Университет им. В.И. Вернадского. — 2024. — № 4(94). — С. 30 – 40. DOI: 10.17277/voprosy.2024.04.pp.030-040. EDN DIOIKQ.

21. Vanreusel A., Hilário A., Ribeiro P. A., Menot L., Arbizu P. M. Threatened by mining, poly-metallic nodules are required to preserve abyssal epifauna // *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, article 26808. DOI: 10.1038/srep26808.

22. Литовко С. С., Григорчук А. В., Михайлов Д. И. Перспективные технологии и оборудование для морской геологоразведки [Электронный ресурс]. URL: https://ocean-inerals.ru/images/xeon/files/Perspektivnye_tehnologii-i-oborudovanie-dlya_morskoi_geologorazvedki_2.pdf (дата обращения: 26.09.2025). **ИМБ**

REFERENCES

1. Svinczov N. Yu. Analysis of possible environmental impacts from the extraction of ferromanganese nodules in the Clarion-Clipperton ore Province of the Pacific Ocean. *Nauchnyy aspekt*. 2023, vol. 29, no. 12, pp. 3670–3677. [In Russ].

2. Yubko V. M., Ponomareva I. N., Lygina T. I. Geological exploration at the ferromanganese nodule deposit in the Clarion-Clipperton zone of the Pacific Ocean: history and research results. *Journal of Oceanological research*. 2023, vol. 51, no. 4, pp. 90–134. [In Russ]. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).5. EDN DKHNUY.

3. Adrianov A. V. Modern problems of studying marine biological diversity. *Biologiya Morya*. 2015, no. 41(6), pp. 387–399. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1063074015060020.

4. *Environmental Management Plan for the Clarion-Clipperton Area (ISBA/17/LTC/7)*, available at: https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/isba-17ltc-7_1_1.pdf (accessed 07.07.2025). [In Russ].

5. *Decision of the Council of the International Seabed Authority on amendments to the Rules for Prospecting and Exploration of Polymetallic Nodules in the Area and Related Issues dated 22.07.2013 (ISBA/19/C/17)*, available at: https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/isba-19c-17_1_1.pdf (accessed 07.07.2025). [In Russ].

6. *Decision of the Assembly of the International Seabed Authority on amendments to the Regulations for Prospecting and Exploration for Polymetallic Nodules in the Area dated July 25, 2013 (ISBA/19/A/9)*, available at: https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/isba-19a-9_1_1.pdf (accessed 07.07.2025). [In Russ].

7. *Guidance to contractors on the assessment of the possible environmental impact of exploration for marine minerals in the Area dated 30.03.2020 (ISBA/25/LTC/6/Rev.1)*, available at: <https://www.isa.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/25ltc-6-rev1-ru.pdf> (accessed 07.07.2025). [In Russ].

8. Qi Zhang, Xuguang Chen, Lubao Luan, Xuanming Ding, Fei Sha, Xuelin Liu Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives. *Earth Energy Science*. 2024, vol. 1, no. 1, pp. 65–84. DOI: 10.1016/j.ees.2024.08.002. EDN HEROVO.

9. *GICO – deep-sea mining on ocean shelves using methods that do not disrupt the ecosystem*. 2023, available at: <https://ocean-minerals.ru/page/dobyicha-morskih-mineralov.php>; <https://ocean-minerals.ru/page/roi-glubokovodnyh-robotov.php> – свободный. [In Russ].

10. Yubko V. M., Ponomareva I. N., Lygina T. I. Current trends in the development of equipment and technologies for exploration and production of ferromanganese nodules and cobalt-rich ferromanganese crusts of the World Ocean. *Journal of Oceanological research*. 2023, vol. 51, no. 4, pp. 186–215. [In Russ]. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).8. EDN SRUNMO.

11. *InterOceanmetal Joint Organization. Benthic Impact Experiment (BIE): Technical and Environmental Results*. InterOceanmetal Joint Organization. Szczecin: IOM, 1998, 78 p. (IOM Technical Report ; No. 3).

12. *Global Sea Mineral Resources. Patania II Trials in the CCZ: Environmental Monitoring Results. Global Sea Mineral Resources*. Brussels : GSR, 2021, 64 p. : ill. (GSR Technical Report).

13. Jones D. O. B., Kaiser S., Sweetman A. K. Environmental impacts of deep-sea mining: A review of current knowledge and future challenges. *Oceanography*. 2017, vol. 30, no. 4, pp. 142–157.

14. Peukert A., Schoening T., Alevizos E., Köser K., Kwasnitschka T., Greinert J. Understanding Mn-nodule distribution and mining impacts using AUV data. *Biogeosciences*. 2018, vol. 15, no. 8, pp. 2525–2549. DOI: 10.5194/bg-15-2525-2018.

15. *China Ocean mineral resources research and development association. Technical specifications for deep-sea tracked vehicles*. COMRA. Qingdao : COMRA Press, 2021, 112 p.

16. Thiel H., Schriever G., Ahnert A., Bluhm H., Borowski C., Vopel K. The DISCOL experiment: Long-term effects of simulated manganese nodule mining on the deep-sea benthos. *Deep Sea Research*

Part II: *Topical Studies in Oceanography*. 2001, vol. 48, no. 17-18, pp. 3749–3760. DOI: 10.1016/S0967-0645(01)00053-6.

17. Miller K. A., Thompson K. F., Johnston P., Santillo D. Sediment plume dynamics during nodule collection tests in the Clarion-Clipperton Zone. *Marine Pollution Bulletin*. 2023, vol. 186, article 114426. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114426.

18. Peukert A., Schoening T., Alevizos E., Köser K., Kwasnitschka T., Greinert J. An in situ study of abyssal turbidity-current sediment plumes generated by a deep seabed polymetallic nodule mining preprototype collector vehicle. *Scientific Reports*. 2022, vol. 12, article 4770. DOI: 10.1038/s41598-022-08506-4.

19. Svintsov N. Yu., Vasyanovich Yu. A. Environmental impact of the spread of a plume of suspended particles in the water column during deep-sea mining of LMC in the Clarion-Clipperton Province of the Pacific Ocean. *International Research Journal*. 2024, no. 8(146). URL: <https://research-journal.org/archive/8-146-2024-august/10.60797/IRJ.2024.146.41> (accessed 25.09.2024). [In Russ]. DOI: 10.60797/IRJ.2024.146.41.

20. Svintsov N. Yu., Vasyanovich Yu. A., Kuznetsov P. A. Comprehensive environmental monitoring during geological exploration and deep-sea mining of iron-manganese nodules in the Clarion-Clipperton Province of the Pacific Ocean. *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*. 2024, no. 4(94), pp. 30–40. [In Russ]. DOI: 10.17277/voprosy.2024.04.pp.030-040. EDN DIOIKQ.

21. Vanreusel A., Hilário A., Ribeiro P. A., Menot L., Arbizu P. M. Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, article 26808. DOI: 10.1038/srep26808.

22. Litovko S. S., Grigorchuk A. V., Mikhaylov D. I. *Advanced technologies and equipment for marine geological exploration*, available at: https://ocean-inerals.ru/images/xeon/files/Perspektivnye_tehnologii-i-oborudovanie-dlya_morskoi_geologorazvedki_2.pdf (accessed 26.09.2025). [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Свинцов Никита Юрьевич — ассистент кафедры,
Владивостокский государственный университет,
e-mail: nikitakorolev92@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

N. Yu. Svintsov, Assistant of Chair,
Vladivostok State University, 690014, Vladivostok, Russia,
e-mail: nikitakorolev92@mail.ru.

Получена редакцией 10.07.2025; получена после рецензии 29.09.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 10.07.2025; received after the review 29.09.2025; accepted for printing 10.11.2025.

