

17–19 ИЮНЯ 2024 ГОДА



Конференция
«Освоение минеральных ресурсов
Мирового океана»

Сборник тезисов



ФГБУ «ВНИИОкеангеология»
Санкт-Петербург



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ
(РОСНЕДРА)

ФГБУ «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГЕОЛОГИИ И МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ МИРОВОГО ОКЕАНА
ИМ. АКАДЕМИКА И. С. ГРАМБЕРГА»
(ФГБУ «ВНИИОКЕАНГЕОЛОГИЯ»)

Конференция

«ОСВОЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ МИРОВОГО ОКЕАНА»

Сборник тезисов

17–19 июня 2024 года



ФГБУ «ВНИИОкеангеология»
Санкт-Петербург
2024



УДК 551.35+553(063)

Конференция «Освоение минеральных ресурсов Мирового океана»: сборник тезисов. Санкт-Петербург, 17–19 июня 2024 года. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2024. — 81 с.

ISBN 978-5-88994-134-7

Современные вызовы, связанные с истощением континентальных месторождений и повышением спроса на сырье для высокотехнологичных отраслей экономики, определяют необходимость выявления новых источников минерального сырья. Глубоководные полезные ископаемые, содержащие стратегически важные компоненты, рассматриваются в качестве дополнительного ресурса цветных, редких и редкоземельных элементов. Рациональное и экологически безопасное освоение океанских полезных ископаемых требует тесного взаимодействия федеральных ведомств и научного сообщества.

Подготавливаемый в настоящее время Федеральный проект «Освоение минеральных ресурсов Мирового океана» призван координировать усилия в данном направлении. Для обсуждения планируемых мероприятий в ходе реализации федерального проекта в соответствии с решениями Морской коллегии и Федерального агентства по недропользованию (Роснедра) проводится конференция «Освоение минеральных ресурсов Мирового океана».

ISBN 978-5-88994-134-7

© Коллектив авторов, 2024

© ВНИИОкеангеология, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Афанасьев А. А., Литовко С. С., Григорчук А. В. ДОБЫЧА ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ «РОЯ» РОБОТОВ-СБОРЩИКОВ.	5
Евдокименко А. В., Жамойда В. А., Григорьев А. Г., Рябчук Д. В. ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОНКРЕЦИИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА: АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ И ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ.	10
Ермилов А. Н. ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ ПРОЕКТОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ: ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ.	12
Захаров М. С., Кондратенко А. В. МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА И МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МИРОВОМ ОКЕАНАХ . . .	13
Кондратенко А. В., Лыгина Т. И., Пуляева И. А., Егоров И. В., Иванов В. Н., Хулапова Т. М., Миноранский Д. Е., Сапрыкин С. С., Захаров М. С., Павлов А. С. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКИХ РАЗВЕДОЧНЫХ РАЙОНОВ ЖМК, КМК И ГПС В ТИХОМ И АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНАХ	17
Константинова Н. П., Якубович О. В., Черкашѐв Г. А. ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА. . .	27
Кулагин Б. П. «РОССИЙСКОЕ МОГУЩЕСТВО ПРИРАСТАТЬ БУДЕТ» БОГАТСТВАМИ МИРОВОГО ОКЕАНА: ДВОЙНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ДВУХПАЛУБНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ МБПК И ЕГО ТЕХНОЛОГИЙ.	31
Кулагин Б. П., Староверов Б. А., Назметдинов И. М. ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЕ ОСВОЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДНА МИРОВОГО ОКЕАНА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БАЛЛАСТИРУЕМОГО ПОЛУПОГРУЖЕННОГО КАТАМАРАНА И РОБОТИЗИРОВАННЫХ «РОЕВ» ГЛУБОКОВОДНЫХ ПРОБООТБОРНИКОВ	35
Лыгина Т. И., Хулапова Т. М. ОЦЕНКА РЕСУРСОВ И ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ РУДЫ И МЕТАЛЛОВ В ПРЕДЕЛАХ РОССИЙСКИХ РАЗВЕДОЧНЫХ РАЙОНОВ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ И КОБАЛЬТОНОСНЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРОК НА ОСНОВЕ РОССИЙСКОЙ КЛАССИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ПОЛОЖЕНИЙ CRIRSCO.	38
Маевский А. М., Занин В. Ю., Печайко И. А. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОСВОЕНИЯ РЕСУРСОВ МИРОВОГО ОКЕАНА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ИХ ГРУПП	43
Мелекесцева И. Ю. СОВРЕМЕННЫЕ И ДРЕВНИЕ СУЛЬФИДНЫЕ ЗАЛЕЖИ, СВЯЗАННЫЕ С ВНУТРЕННИМИ ОКЕАНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ: СХОДСТВА И ОТЛИЧИЯ.	47

Молодцова Т. Н., Ермакова Л. А., Гебрук А. В. ПРИМЕНИМОСТЬ КОНЦЕПЦИИ УЯЗВИМЫХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ В РАЙОНАХ ОСВОЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ	51
Павлюченко С. А., Горлов А. И., Андрейкин Н. В., Колташев Я. А. КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ И АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА — СБОРЩИКА ЖЕЛЕЗОМАНГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ	53
Петров В. А. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОИСКОВЫХ РАБОТ НА ГЛУБОКОВОДНЫЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СУЛЬФИДЫ В АРКТИКЕ И ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЯХ	55
Петухов С. И. ТЕНДЕНЦИИ РАЗРАБОТКИ ДОБЫЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТПИ	58
Седышева Т. Е., Фёдоров Д. С., Сапириди А. П. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЙ НА ПРОФИЛЯХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОНОВЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ СРЕДЫ	62
Силантьев С. А., Буйкин А. И., Гуренко А. А., Чугаев А. В., Шабыкова В. В., Цховребова А. Р., Бельтнев В. Е., Бич А. С. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ АНОМАЛЬНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ПЮИ-ДЕ-ФОЛЬ В ОСЕВОЙ ЗОНЕ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА.	66
Соколов С. Ю., Бич А. С. СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДНЫХ РУД И ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ МАНТИИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЯМ В СЕВЕРНОМ ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОМ СЕГМЕНТЕ СРЕДИННО- АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА	67
Цымбулов Л. Б. СПОСОБЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РУДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ОКЕАНА	71
Чернышёв В. В., Арыканцев В. В., Вершинина И. П., Шаронов Н. Г. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ «ТЯЖЕЛОЙ» ВЕСОВОЙ КАТЕГОРИИ	72
Шакиров Р. Б., Съедин В. Т., Яцук А. В., Саттарова В. В., Астахова Н. В., Колесник О. Н., Валитов М. Г., Ли Н. С., Плетнёв С. П., Пономарёва А. Л., Мальцева Е. В. РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ МОРЕЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РФ И ТИХОГО ОКЕАНА.	76
Юнгмейстер Д. А., Сержан С. Л., Смоленский М. П., Ефимов Ф. А. ПАРАМЕТРЫ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДОБЫЧИ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ПО ДНУ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	78

ДОБЫЧА ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ «РОЯ» РОБОТОВ-СБОРЩИКОВ

Афанасьев А. А., Литовко С. С., Григорчук А. В.

ООО «ГИКО», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: info@ocean-minerals.ru

Как известно, добыча полезных ископаемых ведется сейчас на суше и на шельфе. В перспективе прогнозируется истощение этих запасов и переход к добыче полезных ископаемых со дна океана. Очевидно, что такая добыча должна соответствовать международным экологическим нормам. В докладе речь пойдет в основном о добыче ЖМК.

Для добычи ЖМК необходимо решить ряд задач, каждая из которых, по сути, является вызовом:

- обеспечить минимальное влияние на окружающую среду;
- обеспечить мониторинг экологического следа добычи;
- создать технологию добычи, отвечающую требованиям экологов;
- определить технологию транспортировки — подъема на судно;
- создать эффективную переработку добытых ТПИ.

Наиболее перспективным методом добычи является использование подводных роботов-сборщиков в противовес традиционным методам сбора.

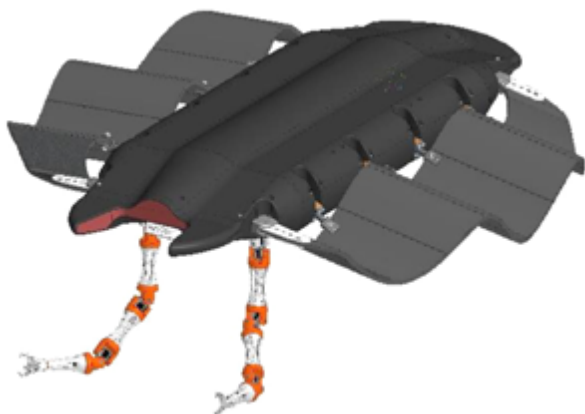


Рис. 1. Робот-сборщик

ООО «ГИКО» ведет разработку «роя» автономных роботов-сборщиков, рассматривая ее как перспективный вариант добычи конкреций, обеспечивающий минимальное влияние на окружающую среду (рис. 1).

Проект по добыче предполагает использовать на глубине до 5000 м специальных роботов — сборщиков

ЖМК, составляющих «рой». Роботы-сборщики доставляются на дно в специальном контейнере, вместимость которого 512 штук (рис. 2). После того как группа роботов-разведчиков размечает границы участка сбора добычи, роботы-сборщики приступают к сбору конкреций.



Рис. 2. Схема добычи конкреций с использованием «роя» роботов

Работа роботов, входящих в «рой», полностью автономна. После заполнения индивидуального бункера роботы-сборщики самостоятельно отправляются к сборочным контейнерам для перегрузки добытого материала и возвращаются к добыче конкреций. Если у робота заканчивается заряд аккумуляторной батареи, он в автоматическом режиме отправляется на подзарядку к центральному контейнеру. Оператору остается следить за наполняемостью контейнера добычи или реагировать на аварийные сигналы дронов.

При выходе робота из строя он либо самостоятельно поднимается на поверхность воды, либо транспортируется служебными роботами в контейнер для подъема на судно. Роботы передвигаются в толще воды при помощи плавников,двигающихся подобно плавникам каракатицы, что позволяет не нарушать поверхность грунта и не поднимать облака взвеси, которые могут губительно сказаться на местной флоре и фауне.

Разрабатываемый способ добычи требует инновационных подходов в решении ряда технических задач:

- компьютерное зрение робота, направленное на детекцию конкреций;
- движение робота, обеспечение сбора и транспортировки конкреций в контейнер;
- энергетика робота: аккумуляторы и их зарядка;
- подводная навигация и связь;
- система управления роем.

Наши работы:

1. На данный момент специалистами ООО «ГИКО» собран опытный макет робота-сборщика, который сейчас обучается движению в открытом бассейне.



2. Используются технологии ИИ и машинного обучения.

2. Настроили компьютер с RTX3090 для обучения особи

Примеры обучения в Isaac sim

1

2

3. Создали модель робо-руки в Rviz для изучения и тестирования

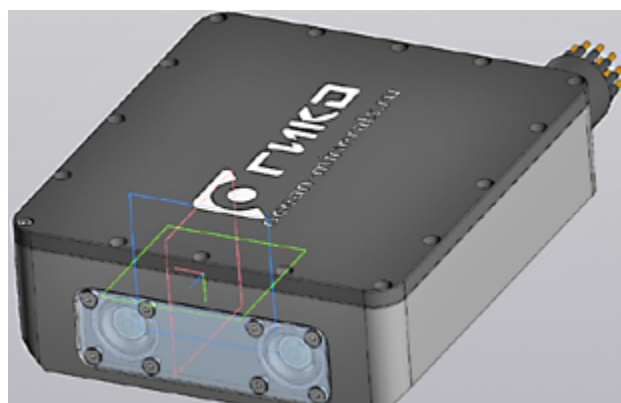
1

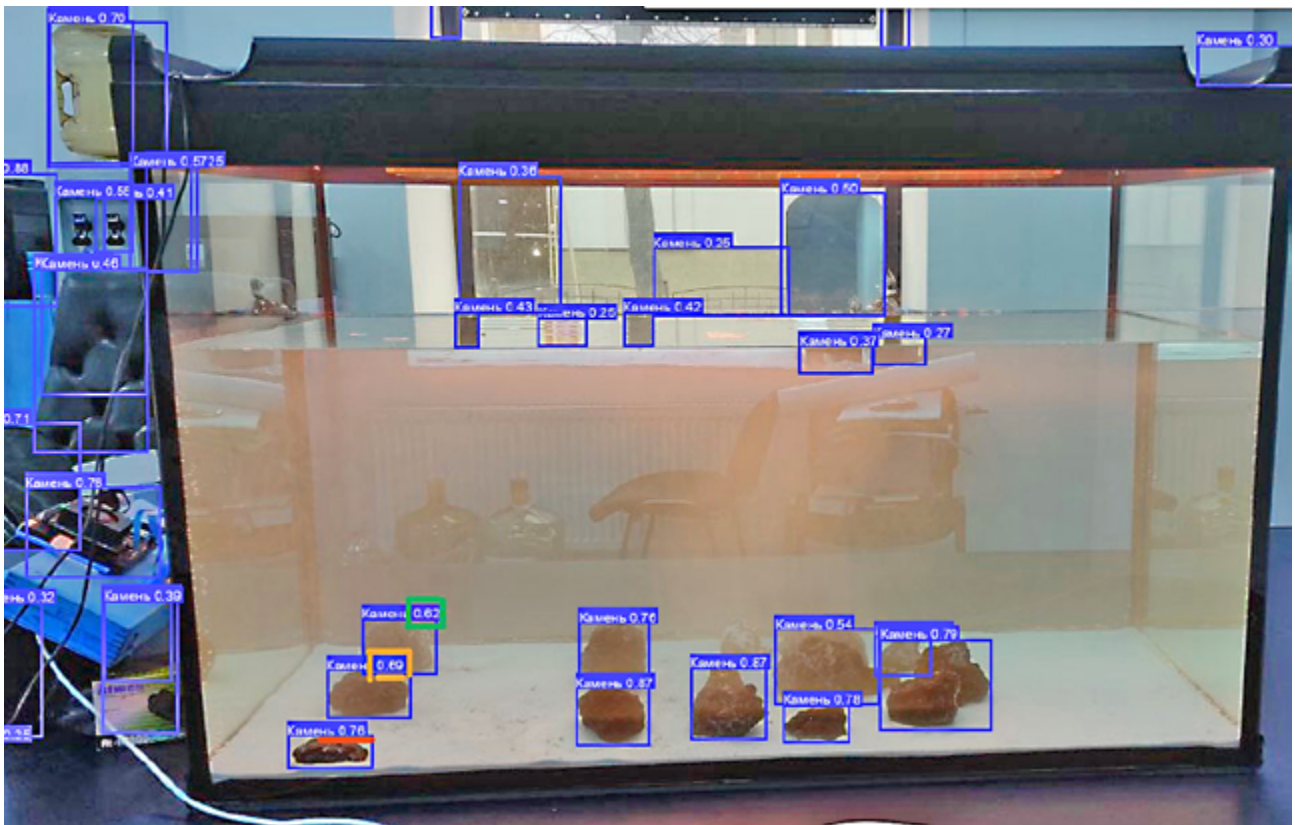
Тестовая рука которая поворачивается и захватывает предметы

2

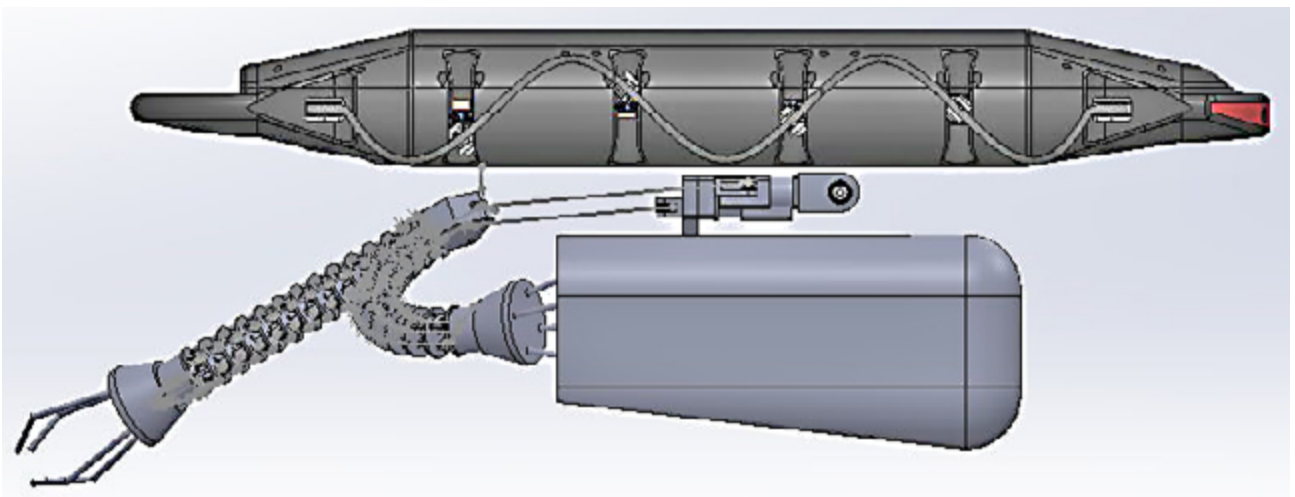
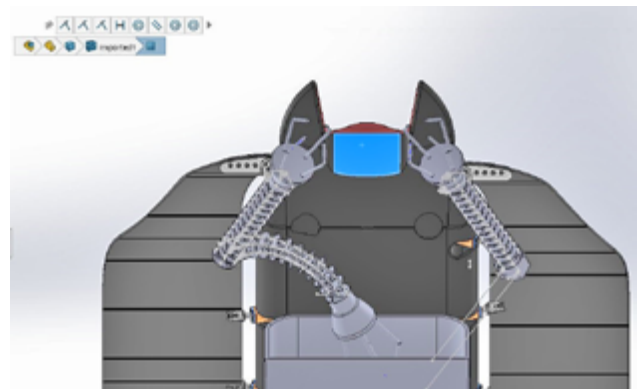
Поиск алгоритмом DDQN, достигнут этап при котором на подведение к кубу тратится 31 действие

3. Разработана система компьютерного зрения, определяющая конкреции и их пространственное положение относительно робота. Здесь также используются технологии ИИ.

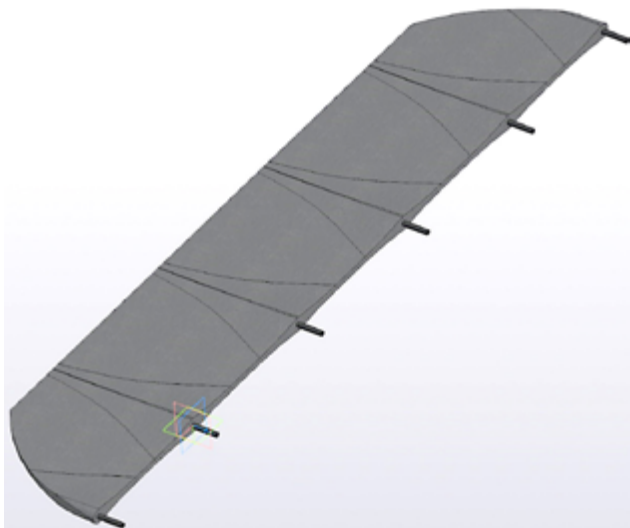




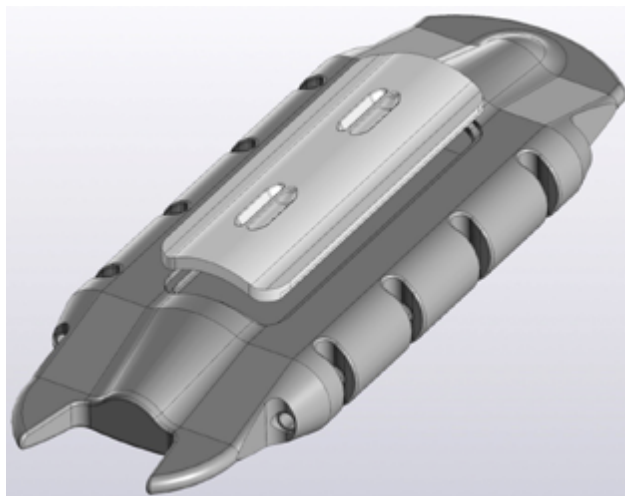
4. Ведутся разработки манипулятора для захвата конкреций, а также сборочного бункера робота для транспортировки и сброса конкреций в контейнер.



5. Разрабатываются наиболее оптимальные модели плавников и кинематика их движения.



6. Разрабатывается модель корпуса с учетом технологичности сборки, обеспечения нулевой плавучести и прочности.



7. Разрабатывается компоновка начинки робота с учетом глубоководного характера работы.

Выводы. Разработка экологически привлекательной добычной техники для сбора конкреций стала очень актуальной на фоне постоянных призывов заморозить все проекты по разработке ТПИ на дне океана. В 2022 г. страны G7 объявили, что они согласятся на горнодобывающие проекты на морском дне только в том случае, если они не нанесут серьезного вреда окружающей среде.

Разрабатываемая специалистами ООО «ГИКО» система добычи конкреций с использованием «роя» роботов-сборщиков является инновационной, и, что очень важно, при ее реализации биоразнообразию морского дна наносится минимальный ущерб.

Перспективные разработки инновационных технологий добычи формируют технологический уклад осознанного будущего.

ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОНКРЕЦИИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА: АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ И ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

FE-MN CONCRETIONS OF THE EASTERN GULF OF FINLAND: NATURAL PROCESSES AND ANTHROPOGENIC IMPACT

Евдокименко А. В., Жамойда В. А., Григорьев А. Г., Рябчук Д. В.

ФГБУ «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: anton_evdokimenko@karpinskyinstitute.ru, vladimir_zhamoida@karpinskyinstitute.ru,
andrey_grigiryev@karpinskyinstitute.ru, daria_ryabchuk@karpinskyinstitute.ru

Evdokimenko A. V., Zhamoida V. A., Grigoriev A. G., Ryabchuk D. V.

FGBU VSEGEI, St. Petersburg, Russia

E-mail: anton_evdokimenko@karpinskyinstitute.ru, vladimir_zhamoida@karpinskyinstitute.ru,
andrey_grigiryev@karpinskyinstitute.ru, daria_ryabchuk@karpinskyinstitute.ru

Ключевые слова: железомарганцевые конкреции, геохимия, Финский залив.

Keywords: ferromanganese nodules, geochemistry, Gulf of Finland.

Исследование направлено на изучение геохимических особенностей железомарганцевых конкреций (ЖМК) в восточной части Финского залива. ЖМК — это современные аутигенные минеральные стяжения оксидов и гидроксидов железа и марганца, формирующиеся на дне водных бассейнов, имеющие разнообразную форму, размеры и химический состав. В восточной части Финского залива широко проявлен процесс конкрециообразования, здесь проходила первая в мире опытно-промышленная добыча мелководных ЖМК, что делает этот участок уникальным.

В процессе работы установлено, что главной эколого-геохимической характеристикой ЖМК является сорбционная способность (Zhamoida et al., 2017), то есть способность поглощать и накапливать широкий спектр химических элементов из морской среды и подстилающих осадков. Особую важность из них представляют типичные поллютанты: тяжелые металлы и фосфор. ЖМК являются ионными ловушками, способствуя очищению бассейна путем сорбции поллютантов. Однако при изменении физико-химических параметров придонной среды происходит растворение ЖМК и десорбция химических элементов из них, что может приводить к вторичному загрязнению морского бассейна (Vallius et al., 2011).

При сравнении района добычи с соседними ненарушенными участками были установлены новые изменения в седиментационной обстановке и геохимической структуре ЖМК.

Полноценный конкреционный слой сохранился только на участках, расположенных вне пределов траншей, оставленных добычным судном, в самих траншеях условия седиментации принципиально отличны. Изучаемый район до проведения добычи характеризовался нулевой или крайне замедленной скоростью терригенной седиментации. В настоящий момент в пределах траншей наблюдаются аномально высокие скорости седиментации — до 1–1,5 см/год. ЖМК растворяются, что свидетельствует о том, что конкреции Финского залива на данном этапе исследования нельзя назвать возобновляемым ресурсом.

Средние концентрации SiO_2 , CaO и TiO_2 в ЖМК из района разработки значительно превышают их средние концентрации в ЖМК ненарушенных участков, а средние концентрации MgO , MnO , Co , Mo , Cu , Pb значительно ниже. Геохимический состав конкреций и геохимическая структура ЖМК, отобранных в районе подводной добычи, отличаются от нормального геохимического состава растущих ЖМК из ненарушенных участков. Наблюдаются признаки селективного выноса компонентов из растворяющихся ЖМК.

В результате изменения условий осадконакопления после подводной добычи погребенные ЖМК растворяются и становятся вторичным источником загрязнения донных отложений и придонной воды. Можно спрогнозировать, что, после того как траншеи от земснаряда будут заполнены и седиментационное равновесие восстановится до первоначального состояния, запустится процесс роста ЖМК.

ЖМК, отобранные с подводных участков добычи, характеризуются преобладанием оксидных и гидроксидных форм нахождения химических элементов. Высокие концентрации органических форм характерны в основном для Cu , Zn , Mo и Cd . Слабоактивные минеральные формы наиболее характерны для Cu , Fe и Zn . Карбонатные формы наиболее значимы для Mn , Ni , Zn и Cd .

Полученные результаты открывают новую ветвь проблематики, связанную с подводной добычей ЖМК, и обозначают их как потенциальный источник дополнительного загрязнения водных бассейнов.

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ ПРОЕКТОВ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ: ПРАКТИКА УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ

Ермилов А. Н.

ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ermilovan@nornik.ru

Аннотация

В работе рассмотрен подход к планированию и организации освоения месторождений полезных ископаемых, применяемый в Группе компаний «Норильский никель». Рассмотрен жизненный цикл проекта недропользования в терминологии управления проектами капитального строительства, начиная с первичного обоснования идеи инвестиционного проекта, подготовки технико-экономических расчетов и проведения предпроектных проработок до реализации и постинвестиционного контроля проекта. Проанализированы основные этапы проектной деятельности с позиции организации планирования и практические аспекты управления рисками. В качестве примера рассмотрен кейс по организации работы по учету международных стандартов ответственного недропользования при проектировании ликвидации объекта недропользования. Делается вывод о том, что более тщательное планирование с учетом возможных рисков и применение инструментария управления проектами позволяют избежать ошибок при реализации крупных инвестиционных проектов.

Ключевые слова: недропользование, обработка месторождений полезных ископаемых, управление проектами, жизненный цикл инвестиционного проекта, ответственное недропользование, управление рисками.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА И МЕТОДИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

Захаров М. С., Кондратенко А. В.

ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: m.zaharov@vniio.ru; a.kondratenko@vniio.ru

В настоящее время методологическая база и предметные методики в области инженерно-геологических океанических исследований находятся в стадии своего дальнейшего развития и в существенной степени определяют содержание и направление дальнейшего развития инженерной геологии в целом. Систематизация инженерно-геологической информации на научной основе началась в 80-х годах прошлого столетия, когда было развернуто изучение инженерно-геологических условий рудных объектов в различных районах Мирового океана, что затем было закреплено в различных документах Международного органа по морскому дну (МОМД).

По мере развития этих работ и перехода к детальным исследованиям в различных российских разведочных районах перед инженерной геологией как наукой возникли новые проблемы как методологического, так и методического характера. Решение этих проблем будет определять как место и роль инженерно-геологических исследований в общей программе изучения Мирового океана, так и их результативность.

В настоящее время методология океанической инженерной геологии, как сумма принципов и подходов к изучению своего объекта, требует уточнения в связи с оформившимися основными трендами развития науки и техники, вытекающими из запросов современного постиндустриального общества.

Первое направление методологической работы резко расширяет круг задач по рациональному использованию и охране геологической среды планеты как на суше, так и под водой. Чем ближе становится реализация проектов использования минеральных ресурсов, скрытых водной толщей Мирового океана, тем жестче становятся экологические требования к проектам разработки подводных месторождений. Возникают серьезные требования к энергетическому обеспечению

металлургического производства, к логистике и размещению таких производств. Эта всеобщая взаимосвязь предметных исследований на современной экологической платформе становится краеугольным камнем новой парадигмы всего семейства геологических наук в XXI в. Связь инженерно-геологических и экологических аспектов глубоководных исследований достаточно очевидна, но на современном этапе требует постановки новых задач и поиска новых решений, прежде всего в отношении планирования и производства комплексных исследовательских проектов, учитывая тот факт, что сама инженерная геология как новая область геологических знаний стала первым ответом человечества на экологические вызовы, обусловленные капитальным строительством и формированием планетарной техносферы. Распространение техносферы на Мировой океан заставляет интенсифицировать исследования геологической среды океанов в рамках специальных программ, требующих значительных материальных ресурсов и международного сотрудничества. Проблемы изучения дна Мирового океана приобретают глобальный и взаимопроникающий характер, при этом методологической платформе океанической инженерной геологии следует уделять пристальное внимание, тем более что в указанной области инженерно-геологические исследования занимают особое место, поскольку именно они формируют совершенно новые знания о геологической среде и возможных направлениях ее трансформации после нарушения сложившихся природных равновесий. Выход инженерно-геологических работ в глубоководные районы Мирового океана должен стимулировать решение ряда сложных научно-технических, технологических и методических задач, связанных с вопросами рационального использования и охраны окружающей среды в самом широком смысле этих понятий. При этом, с одной стороны, комплексирование, а с другой — разграничение инженерно-геологических исследований с другими направлениями исследования океанов становятся крайне необходимыми, особенно для оптимизации использования информационных потоков и построения различных моделей геологической среды.

Второе направление методологической работы должно в полной мере учитывать прогресс в области как технических средств подводных работ и наблюдений, так и предполагаемых механизмов и технологий разработки подводных месторождений. Положение в этой области стремительно меняется. Это касается средств подводных наблюдений и пробоотбора, роботизации и автоматизации подводных работ, предлагаемых типов подводных тестеров, роботов и аппаратуры для мониторинга за состоянием водной и геологической среды. Мощным стимулом развития инженерно-геологического направления в работах различных подрядчиков являются прежде всего проекты добычной техники и различных видов оборудования, контактирующих и взаимодействующих с океаническим дном.

На выровненных участках океанического дна наиболее эффективными выглядят гусеничные машины — рудосборщики и гидролифтовый подъем рудной массы на

суда сопровождения. Такие машины легко передвигаются и маневрируют в пределах выровненных участков (при уклонах донной поверхности до 5°), эффективно собирают рудные массы и сортируют их перед подъемом на поверхность. Блоки вспененного материала, прикрепленные к корпусу, позволяют минимизировать давление на донные грунты даже с очень низкими прочностными характеристиками (до 10 кПа по вращательному срезу). Для сборщиков этого типа разработана специальная гидролифтовая система подъема пульпы на суда сопровождения, где происходит дополнительная сепарация и обезвоживание рудной массы. Дополнительные устройства в виде удлинённых кожухов, прикрепленных к корпусу машин, позволяют минимизировать образование мутьевых потоков (плюмов). Прогресс в области разработки мощных аккумуляторных батарей еще больше повышает эффективность таких машин, рассчитанных на длительные сроки эксплуатации. Как показывают реальные испытания прототипов таких сборщиков, они весьма чувствительны к различного рода препятствиям на океаническом дне — воронкам, уступам, трещинам, что может вызвать пробуксовку гусениц и боковой снос машины с намеченного курса.

Особое внимание привлекают машины и технологии, предназначенные для разработки глубоководных полиметаллических сульфидов. Габариты и весовые характеристики таких машин требуют особого внимания к расчетам их взаимодействия с различного типа донными образованиями при перемещении в пределах рабочих полигонов. Работоспособность такого парка машин потребует особой организации рабочего пространства (рабочие уступы, отвалы, всевозможные трассы, охранные зоны кабелей, площадки размещения техники и других устройств). Кроме того, вокруг разработок будет размещаться густая сеть различного рода сенсорных платформ, штативов, боксов, якорных блоков автоматических буйковых станций и другого вспомогательного оборудования для отслеживания изменений океанической среды, в том числе динамики придонных вод, плюма, шумового и светового загрязнений и т. п. Проекты этого оборудования требуют надежных расчетных показателей для донных образований, находящихся в широком диапазоне физического состояния (от текучих осадков до пород скального типа). Надежность многих показателей может гарантироваться только специальными средствами пробоотбора и экспериментами *in situ*.

Третье направление методологической и методической работы должно формироваться с учетом революционных преобразований в области информационных технологий. Следует подчеркнуть, что конечный продукт инженерно-геологических исследований — это геопространственная информация в виде специализированных текстов, таблиц, картографических приложений и разнообразной иллюстративной графики. Инженерно-геологическая информация существенно расширяет общую базу данных по любым подводным объектам. Такая информация, во-первых, должна отвечать определенным критериям полноты,

достоверности, точности и адаптивности к конкретным запросам пользователей; во-вторых, она должна быть унифицированной, логичной и достаточно простой для обработки, анализа и подключения к решению конкретных задач. Подводные инженерно-геологические исследования различных рудных объектов в Мировом океане чрезвычайно специфичны в части своих задач, организационно-технических мероприятий, аппаратурно-приборного обеспечения, методов наблюдения, накопления, хранения и обработки информации и представления ее различным потребителям. Вся эта информация должна быть интегрирована в структуру результатов геологоразведочных работ на океаническом дне так, чтобы любой пользователь мог получить ответ на свой запрос инженерно-геологического содержания в дискретной или обобщенной форме.

Повседневная практика показывает, что инженерно-геологическая информация в большей или меньшей степени находит свое применение при решении самых разнообразных задач, которые затрагивают различные естественно-научные и технические области знаний и практик. Это проверка теоретических и математических моделей поведения водной толщи, особенно в придонной части, связанных с возмущением и перемещением верхнего слоя осадков; экспериментальные работы по изучению процессов перемещения конкреций и рудных масс с использованием лотков, бассейнов, имитаторов рудного материала; проверка на экологичность всех операций технологического процесса сбора, хранения и транспортировки минеральных масс разной размерности; краткосрочный и долгосрочный мониторинг за геологической средой; проверка работоспособности различных механизмов и аппаратов.

Рассмотренные выше тренды очерчивают круг задач по разработке методического обеспечения весьма широкого спектра инженерно-геологических работ и наблюдений непосредственно в ходе выполнения всего комплекса геологоразведочных работ, особенно при выполнении сканирования и зондирования как поверхности океанического дна, так и геологического разреза. Результаты таких работ должны дать возможность построения комплексных объемных моделей, включающих атмосферный, гидросферный и литосферный пакеты актуальной информации, сформированные по запросам пользователей, работающих в том или ином районе Мирового океана. В настоящее время накопленный опыт и полученные результаты позволяют создать единый свод правил инженерно-геологических исследований, выполняемых в российских разведочных районах ЖМК, КМК и ГПС в составе геологоразведочных работ на той методологической платформе, которая была рассмотрена выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКИХ РАЗВЕДОЧНЫХ РАЙОНОВ ЖМК, КМК И ГПС В ТИХОМ И АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНАХ

Кондратенко А. В.¹, Лыгина Т. И.², Пуляева И. А.², Егоров И. В.¹, Иванов В. Н.³,
Хулапова Т. М.², Миноранский Д. Е.², Сапрыкин С. С.², Захаров М. С.¹, Павлов А. С.¹

¹ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

² АО «Южморгеология», Геленджик, Россия

³ АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция»,
Санкт-Петербург, г. Ломоносов, Россия

E-mail: a.kondratenko@vniio.ru; lyginati@rusgeology.ru; IvanovVN@rusgeology.ru

Инженерно-геологические исследования в составе геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые Мирового океана являются одним из важных направлений проводимых исследований, значение которых возрастает по мере детализации разведочных работ. Изучение инженерно-геологических условий Российских разведочных районов, наряду с оценкой ресурсного потенциала и фоновых экологических исследований, следует рассматривать как одно из ведущих направлений, влияющих на определение перспективности рудных залежей для дальнейшей разведки и последующей их разработки. Кроме того, результаты инженерно-геологических исследований необходимы для обеспечения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке технических средств разведки и добычных технологий.

Изученность. В Российском разведочном районе железомарганцевых конкреций (РРР-ЖМК) геологоразведочные работы выполняются на основании контракта с МОМД на разведку ЖМК от 2001 г. и соглашениями о продлении контракта до 2021 и 2026 гг. С 2017 г. в РРР-ЖМК в пределах Восточного полигона, на участке первого пятилетнего добычного блока проводятся геологоразведочные работы разведочной стадии масштаба 1:50 000. По состоянию на 2024 г. завершены разведочные работы на площади 1610 км², в пределах которой выделена единая крупная залежь ЖМК плащеобразного типа общей площадью 1020 км² [5].

В Российском разведочном районе кобальтоносных железомарганцевых корок (РРР-КМК) по состоянию на 2024 г. (контракт с МОМД от 2015 г.) завершены геологоразведочные работы оценочной стадии масштаба 1:50 000 на гайотах Говорова (кластеры 08-1, 08-2, 08-3), Вулканолог (кластер 09-1), Коцебу (кластеры 14-1, 14-2, 14-3) и Альба (кластеры 15-1, 15-2).

В Российском разведочном районе глубоководных полиметаллических сульфидов (РРР-ГПС) в 2020 г. завершены геологоразведочные работы поисковой стадии (контракт с МОМД от 2012 г.). В результате проведенных исследований открыто 23 рудных поля и 6 рудопроявлений [10]. В настоящее время в северной части РРР-ГПС ведутся геологоразведочные работы оценочной стадии масштаба 1:10 000. Они выполнены на рудном поле Пюи-де-Фоль (2023) и продолжаются на рудных полях Сюрприз, Юбилейное, Петербургское и Зенит-Виктория.

В Российских разведочных районах инженерно-геологические исследования проводятся систематически в составе геологоразведочных работ и направлены на комплексную характеристику и оценку сложности инженерно-геологических условий подводной добычи ЖМК, КМК и ГПС.

Инженерно-геологические исследования в РРР-ЖМК и РРР-КМК выполняет АО «Южморгеология», а в РРР-ГПС АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» совместно с ФГБУ «ВНИИОкеангеология».

Разведочные кондиции. Для РРР-ЖМК и РРР-КМК подготовлены технико-экономические соображения о возможном промышленном значении месторождения ЖМК [8] и о целесообразности постановки поисково-оценочных работ на КМК [9] с проектом оценочных кондиций. При оконтуривании рудных залежей ЖМК в процессе разведочных работ исключаются площади развития донных препятствий для работы агрегата сбора: с уклонами более 60; с уступами свыше 0,5 м; с выходами тугопластичных, полутвердых и скальных пород, с каменными развалами и т. п.

Оконтуривание рудных залежей КМК в процессе оценочных работ выполняется согласно действующим кондициям (промышленная мощность корок не менее 4 см). Для РРР-ГПС разведочные кондиции находятся в стадии разработки.

Методы инженерно-геологических исследований. Инженерно-геологические исследования в Российских разведочных районах выполняются попутно в процессе геологоразведочных работ. Можно выделить две группы методов:

1. Точечные дискретные, связанные с опробованием, в том числе бурением и зондированием, донных образований (руды, вмещающие породы и осадки) и последующим изучением их состава, состояния и физико-механических свойств. Эти методы обеспечивают разработку инженерно-геологической стратификации, а также обобщение и заключение о пространственной неоднородности донных образований, в том числе методами эмпирической статистики, там, где это обеспечено представительным фактическим материалом с выходом на статистические зависимости в пределах выделяемых рудных залежей.
2. Площадные непрерывные, связанные с анализом всей поступающей геолого-геофизической информации (батиметрия, геоакустическое профилирование,

локация бокового обзора, фототелепрофилирование), что позволяет решать задачи пространственных обобщений при характеристике инженерно-геологических условий и оценке их сложности и/или благоприятности для изучаемых рудных объектов в части их опробования и разработки. Соответственно, результаты этой работы представлены специальными графическими построениями: блок-диаграммами, инженерно-геологическими разрезами и профилями, картами (схемами) инженерно-геологических условий и инженерно-геологического районирования в заданных масштабах.

Российский разведочный район железомарганцевых конкреций в рудной провинции Кларион-Клиппертон (Тихий океан) состоит из двух полигонов (Восточного и Западного) общей площадью 75 тыс. км². В геологическом строении Восточного полигона принимают участие магматические породы фундамента и глинистые, карбонатные и карбонатно-глинистые отложения осадочного чехла в стратиграфическом диапазоне от среднего эоцена до голоцена включительно. Базальтовое ложе фундамента имеет блоковую структуру, сформированную системой разрывных нарушений. Для осадочного чехла мощностью 100–150 м характерно горизонтальное и субгоризонтальное залегание слоев с проявлением складчатых дислокаций в приразломных зонах и в местах внедрения в осадочный чехол базальтовых интрузий. В верхней части разреза преобладают кремнисто-глинистые и глинистые осадки, включающие ЖМК, которые сосредоточены в геохимически активном слое мощностью до 10–15 см и характеризуются струйчатым, ленточным и плащеобразным типами рудных скоплений. На Восточном полигоне глинистые и кремнисто-глинистые осадки, включающие ЖМК, характеризуются низкими значениями плотности (1,14–1,22 г/см³) и сопротивления вращательному срезу (0,7–2,6 кПа). Показатели физико-механических свойств конкреций: плотность 1,81–2,14 г/см³; предел прочности на одноосное сжатие изменяется в диапазоне от 0,3 до 3,4 МПа. Глинистые и кремнисто-глинистые осадки, подстилающие геохимически активный слой, в интервале опробования от 0 до 4 м характеризуются значениями плотности 1,2–1,3 г/см³, сопротивления вращательному срезу 1,8–17,4 кПа [3]. Рудная залежь ЖМК плащеобразного типа, оконтуренная в процессе разведочных работ на первом пятилетнем блоке, залегает на пологой поверхности дна в интервале глубин от 4650 до 4900 м на слабых глинистых осадках.

Наряду со слабыми донными осадками, подстилающими конкрециеносный слой, определенные проблемы для работы агрегата сбора ЖМК будут оказывать препятствия, связанные с особенностями геологического строения региона и микрорельефом дна. Препятствия представлены в основном линейными неглубокими врезами в осевых частях впадин и мелкими воронками глубиной в первые метры, уступами высотой в десятки сантиметров, выходами на донную поверхность базальтов и литифицированных глинистых и карбонатных дочетвертичных отложений, скоплениями и отдельными обломками осадочных и магматических пород, а также корково-конкреционных образований крупнее 20 см.

Российский разведочный район кобальтоносных марганцевых корок.

Изначально в пределах района выделено 150 разведочных блоков общей площадью около 3000 км² (20 км² каждый), расположенных на гайотах Говорова, Вулканолог, Коцебу и Альба (Магеллановы горы, Тихий океан). Блоки сгруппированы в кластеры, находящиеся в непосредственной близости друг от друга. На текущий момент, после первого отказа в 2023 г. от одной трети изначально выделенного района, площадь РРР-КМК составила 2000 км² [7].

Гайоты Магеллановых гор сложены вулканогенными и осадочными образованиями мезозоя — кайнозоя. Они характеризуются разными размерами и морфологией. Гайоты Говорова и Коцебу имеют сложную неправильную форму. Гайот Говорова обладает ломаными очертаниями, осложнен многочисленными отрогами и сателлитными постройками, склоны характеризуются различной крутизной и расчлененностью. Гайот Коцебу состоит из двух горных построек — западной и восточной. Гайоты Вулканолог и Альба имеют более простые формы, обладают близкими к изометричным основаниями, характеризуются явно выраженными вершинными плато.

Среди железомарганцевых руд выделяют кобальтоносные марганцевые корки (КМК), корково-конкреционные образования (ККО) и россыпи конкреций. Из них до 80% рудных образований представлено КМК. Рудные залежи корок, представляющие промышленный интерес, приурочены к периферийным вершинным поверхностям и склонам гайотов и расположены в интервале глубин от 1180 до 3200 м.

Породы субстрата представлены разновозрастными базальтами, рифогенными и планктоногенными известняками, гиалокластитами и лавокластитами, эдафогенными брекчиями и туфами.

В пределах РРР-КМК полный стратифицированный разрез корок представлен четырьмя слоями. Выделенные слои КМК имеют устойчивые текстурно-структурные, вещественные и возрастные признаки, а также характерные физико-механические свойства [6, 12]. Как показала многолетняя практика изучения КМК, для их физико-механических свойств характерна как высокая степень неоднородности по разрезу за счет слоистости, так и значительная пространственная изменчивость в пределах выделенных слоев. Изменчивость в пределах выделенных слоев КМК, особенно для прочности корок, зависит от их пористости, кавернозности и трещиноватости. Статистические характеристики физико-механических свойств КМК, вычисленные для трех гайотов (Говорова, Вулканолог, Коцебу), свидетельствуют о высокой неоднородности корковых образований:

- слой I-1 представлен наиболее плотными (среднее значение плотности 2,10 г/см³) и прочными (среднее значение прочности на сжатие 15,1 МПа) корковыми образованиями, залегающими на породах субстрата;

- слой I-2 наиболее близок к контактирующему с ним слою I-1 при средних значениях плотности $2,01 \text{ г/см}^3$ и прочности на сжатие $11,0 \text{ МПа}$;
- слой II в разрезе занимает промежуточное положение между подстилающим его первым слоем и перекрывающим третьим слоем. Характеризуется минимальными значениями плотности (среднее значение $1,79 \text{ г/см}^3$) и прочности на сжатие (среднее значение $3,3 \text{ МПа}$);
- слой III залегает с поверхности и в нижней части контактирует со вторым слоем. По значениям показателей физико-механических свойств отличается от второго слоя более высокими значениями плотности (среднее значение $1,89 \text{ г/см}^3$) и прочности на сжатие (среднее значение $4,7 \text{ МПа}$), уступая по этим показателям первому слою.

Контрастность физико-механических свойств отдельных слоев КМК, особенно нижних двух (слои I-1 и I-2) по отношению ко второму (слой II) и третьему (слой III), следует рассматривать как осложняющий технологический фактор при различных способах отделения КМК от пород субстрата. Если отделение КМК будет происходить по слабому контакту, на границе второго и первого слоев, то в этом случае будут потери рудной массы, представленной нижними слоями.

В РРР-КМК доминирующее положение в качестве пород субстратов занимают известняки (47–81%) и эдафогенные брекчии (13–36%). В большей части разведочных кластеров их совместная частота встречаемости превышает 50%. Далее по убывающей идут базальты (3–29%) и гиалокластиты с лавокластитам (7–21%). Подчиненное положение по частоте встречаемости занимают тефроида (6–20%) и туфы (3–4%).

По инженерно-геологической классификации [2] все породы субстратов КМК подразделяются на две группы: полускальные (предел прочности на сжатие от 0,5 до 50 МПа) и скальные (предел прочности на сжатие более 50 МПа). К группе полускальных пород прочных и средней прочности могут быть отнесены известняки планктоногенные, гиалокластиты, тефроида и туфы. Прочность базальтов, известняков органогенно-обломочных, брекчий эдафогенных и лавокластитов изменяется в широких пределах, демонстрируя принадлежность как к группе скальных, так и полускальных пород. Неоднородность и изменчивость показателей физико-механических свойств осадочных и вулканогенно-осадочных пород определяются многими факторами: вещественный состав пород, структурно-текстурные особенности, степень их литификации, включения рудного и глинистого материала, состав цемента и проявления фосфатизации. Прочность базальтов определяется в том числе и степенью их выветривания.

На слабых субстратах (туфы и тефроида) возможно разубоживание рудной массы при отделении КМК от субстрата. Разнообразие пород субстратов, неоднородных по физико-механическим свойствам, вызывает необходимость их типизации и на этой

основе проведения специального инженерно-геологического районирования рудных залежей и разработки технологии селективной выемки КМК.

Российский разведочный район глубокоководных полиметаллических сульфидов расположен в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта (Атлантический океан). В настоящее время площадь РРР-ГПС составляет 2500 км², после отказа (по правилам МОМД) от части (75%) изначально заявленной площади в 10 000 км². Оставшиеся площади РРР-ГПС включают ранее открытые рудные поля и потенциально перспективные участки. В геологическом строении региона принимают участие донные осадки (карбонатные, карбонатные уплотненные гидротермально измененные, металллоносные), толеитовые базальты и породы габбро-перидотитового комплекса. Сульфидное оруденение представлено как отдельными рудными постройками (трубами) различной морфологии высотой от первых до нескольких десятков метров (максимально до 45 м), так и крупными рудными холмами (предположительно, высотой до нескольких десятков метров). Площадь рудных полей изменяется в пределах от 0,07 до 2,59 км², при этом суммарная площадь всех рудных полей РРР-ГПС не превышает 14 км². Рудные поля РРР-ГПС локализованы в батиметрическом интервале от 1900 до 4200 м. Более половины рудных полей (15 из 23) приурочены к интервалу глубин 2000–3000 м. Перепад глубин океана в пределах рудных полей является одним из показателей сложности инженерно-геологических условий рудных объектов. В контурах 50% рудных полей перепад глубин не превышает 200 м, в контурах второй половины рудных полей перепад глубин изменяется от 200 до 500 м. Рудные поля в основном приурочены к склоновым поверхностям и, за редким исключением, к субгоризонтальным поверхностям дна.

Характерной особенностью донных образований РРР-ГПС является широкий диапазон изменчивости физико-механических свойств сульфидных руд и магматических пород. Массивные сульфидные руды представлены различными минеральными ассоциациями [4, 11]. Главные рудные минералы — пирит, марказит, халькопирит и сфалерит. Основные нерудные минералы — кварц, опал и барит. В связи с большим разнообразием минерального состава и структурно-текстурными особенностями сульфидных руд их физико-механические свойства изменяются в очень широких диапазонах (плотность 1,77–4,52 г/см³, предел прочности на одноосное сжатие 0,6–198,0 МПа) в пределах как рудных полей, так и отдельных рудных тел.

Магматические породы, вмещающие сульфидные руды, представлены базальтами и породами габбро-перидотитового комплекса. Базальты, как правило, скальные породы высокой плотности и прочности (плотность породы 2,64–2,94 г/см³, предел прочности на одноосное сжатие 93,4–295,0 МПа). Габброиды (плотность породы 2,60–3,06 г/см³, предел прочности на одноосное сжатие 28,3–164,0 МПа)

и серпентинизированные перидотиты (плотность породы 1,45–2,82 г/см³, предел прочности на одноосное сжатие 1,8–131,8 МПа) существенно уступают базальтам по прочностным характеристикам. Важную роль в формировании физико-механических свойств вмещающих пород играют процессы гидротермальных изменений, которые значительно снижают прочностные показатели магматических пород.

Донные осадки в пределах рудных объектов представлены биогенными фораминиферовыми, кокколито-фораминиферовыми и фораминиферо-кокколитовыми, преимущественно калькарбонатными ($\text{CaCO}_3 \geq 75\%$) и карбонатными ($50\% \leq \text{CaCO}_3 < 75\%$), разновидностями, а также птероподовыми песками, которые обычно формируют поверхностный слой осадков.

В пределах рудных полей донные осадки карбонатного ряда представлены слабыми разновидностями. По разрезу (глубина инженерно-геологического опробования не превышала 0,75 м) и латерали характеризуются умеренной изменчивостью (плотность грунта 1,40–1,58 г/см³, сопротивление вращательному срезу 2,8–12,2 кПа).

К опасным геологическим процессам, характерным для РРР-ГПС, следует отнести гидротермальную активность в пределах рудных полей, современные тектонические движения, общую сейсмическую активность региона и проявление склоновых (гравитационных) процессов. На значительной части рудных объектов выявлены прямые (визуальные) или косвенные признаки современной гидротермальной активности, что значительно повышает коррозионную агрессивность морской среды и самих осадков по отношению к конструкционным материалам. Развитие тектонических движений приводит к образованию разномасштабной трещиноватости в массивах горных пород, что, в свою очередь, нарушает их (массивов) сплошность и снижает устойчивость склонов, создавая предпосылки для развития гравитационных смещений. Сейсмическая активность региона, наряду с уклонами поверхности дна, является одним из основных факторов, определяющих интенсивность проявления гравитационных процессов в пределах рудных полей ГПС. Максимальные значения магнитуды в регионе достигают 5,8 [1]. Значительные участки рудных полей расположены на склонах, уклоны которых превышают 15° и более. Эти поверхности являются потенциально опасными с точки зрения развития на них гравитационных процессов, инициированных сейсмической активностью или техногенным воздействием при проведении разведочных или добычных работ. В процессе исследований рельефа рудных полей зафиксировано проявление различного рода гравитационных процессов, таких как оползание осадков, осыпание и обрушение донно-каменного материала.

Результаты инженерно-геологических исследований, выполненных на поисковой стадии геологоразведочных работ, свидетельствуют о высокой степени неоднородности инженерно-геологических условий в пределах как РРР-ГПС, так и отдельных рудных полей.

Выводы. 1. Инженерно-геологические условия в пределах первого пятилетнего блока (Восточный полигон РРР-ЖМК) по результатам геологоразведочных работ разведочной стадии в пределах рудных залежей характеризуются как относительно простые: рудные залежи ЖМК приурочены к горизонтальным и субгоризонтальным поверхностям дна с углами наклона до 60, которые занимают от 80 до 92% поверхности дна; приповерхностный слой осадков, вмещающий ЖМК, представлен слабыми глинистыми и кремнисто-глинистыми осадками, что создает благоприятные предпосылки для извлечения и отмывки ЖМК от вмещающих донных осадков; ЖМК — залегающие на поверхности осадков твердые полускальные образования малой и средней прочности, что не потребует энергоемких технологий для их отрыва от субстрата и дробления перед подъемом на борт судна; глинистые и кремнисто-глинистые осадки, подстилающие слой с ЖМК, характеризуются низкой несущей способностью, однако при этом изменчивость физико-механических свойств по разрезу и латерали незначительна, что упрощает геотехнические расчеты при проектировании агрегатов сбора ЖМК; осложненность поверхности дна различными препятствиями (рвы, воронки, уступы, развалы и т. п.) носит локальный характер (не более 5% от площади залежей). Это создает благоприятные предпосылки для успешной разработки технологии добычи ЖМК и реализации добычных проектов в РРР-ЖМК. Отрицательная позиция по отношению к РРР-КМК и РРР-ГПС — глубина океана (более 4000 м).

2. Важнейшими факторами, определяющими сложность инженерно-геологических условий рудных залежей РРР-КМК, являются крутые склоны гайотов и неоднородность массива КМК и подстилающих пород. Контрастность физико-механических свойств двух нижних слоев КМК (слои I-1 и I-2) по отношению ко второму (слой II) и к третьему (слой III) следует рассматривать как осложняющий фактор при отделении корок от пород субстрата. В этом случае возможны потери рудной массы, если отделение КМК будет происходить по слабому контакту, по границе между первым и вторым слоями. Многообразие пород субстратов и неоднородность их физико-механических свойств вызывают необходимость рассматривать варианты селективной добычи КМК с учетом возможности разубоживания рудной массы на слабых субстратах (туфы, тефроиды). Таким образом, в ряде Российских разведочных районов в Мировом океане разработка рудных залежей в пределах РРР-КМК будет представлять достаточно сложную научно-техническую задачу, так как потребует разработки технологии отделения полускальных корок от различных типов субстратов (скальных, полускальных) с минимальными потерями (без разубоживания) в условиях сложного рельефа дна на относительно крутых склонах гайотов.

3. Результаты инженерно-геологических исследований, выполненных на поисковой стадии геологоразведочных работ, свидетельствуют о высокой степени неоднородности инженерно-геологических условий рудных полей РРР-ГПС.

Основные осложняющие факторы: уклоны дна (свыше 15°), на которых затруднены пробоотбор (буровые работы) и дальнейшая перспективная разработка рудных залежей; в большинстве своем высокая прочность массивных сульфидных руд и вмещающих базальтов и пород габбро-перидотитового комплекса, что потребует мощного энергоемкого оборудования для механического разрушения рудных залежей и вмещающих их пород; риски, связанные с развитием опасных геологических (гравитационных) процессов при сейсмической активизации или техногенном воздействии; развитие в пределах рудных полей слабых донных осадков, которые подлежат экскавации перед началом отработки рудных залежей ГПС. В целом в инженерно-геологическом отношении РРР-ГПС недостаточно изучен, что не позволяет пока делать достоверные выводы об инженерно-геологических условиях разведочного района.

Список литературы

1. *Болдырев С. А.* Сейсмогеодинамика Срединно-Атлантического хребта. М.: Национальный геофизический комитет РФ, 1998. 126 с.
2. Инженерная геология рудной провинции Кларион-Клиппертон в Тихом океане / Я. В. Неизвестнов, А. В. Кондратенко, С. А. Козлов и др. // Труды ВНИИОкеангеология Министерства природных ресурсов РФ и РАН. Т. 197. СПб.: Наука, 2004. 281 с.
3. *Кондратенко А. В.* Физико-механические свойства донных образований на глубоководных месторождениях железомарганцевых конкреций // Горный журнал. 2012. № 3. С. 37–41.
4. *Кондратенко А. В., Егоров И. В., Козлов С. А., Бельтенёв В. Е., Васильева М. С., Кондратюк Е. М., Павлов А. С.* Инженерно-геологические условия разведки и разработки гидротермальных рудных полей (Срединно-Атлантический хребет, Российский разведочный район) // Сборник тезисов докладов 10-й Международной конференции «Полезные ископаемые Мирового океана», 20–22 июня 2023 г. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2023. С. 93–100.
5. *Лыгина Т. И., Миноранский Д. Е., Папсулесова С. Г., Сапрыкин С. С.* Оценочная и разведочная стадии ГРР на абиссальные железомарганцевые конкреции: методика и результаты // Сборник тезисов докладов 10-й Международной конференции «Полезные ископаемые Мирового океана», 20–22 июня 2023 г. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2023. С. 112–115.
6. *Мельников М. Е., Седышева Т. Е., Хулапова Т. М.* Горно-геологические условия локализации кобальтоносных марганцевых корок // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2004. № 1. С. 34–41.
7. Правила поиска и разведки кобальтоносных железомарганцевых корок в Районе / Документ ISBA/18/A/11. Международный орган по морскому дну. Кингстон, 16–27 июля 2012 г. 57 с.
8. Техничко-экономические соображения (ТЭС) о возможном промышленном значении месторождения железомарганцевых конкреций на выделенном Советскому Союзу участке морского дна площадью 75 тыс. км² в зоне Кларион-Клиппертон Тихого океана (с проектом оценочных кондиций). Кн. 1. М., 1990.
9. Техничко-экономические соображения (ТЭС) о целесообразности постановки поисково-разведочных работ на кобальтомарганцевые корки в пределах поля Магеллановы горы (с проектом оценочных кондиций). Петропавловск-Камчатский, 1994. 89 с.

10. Черкашѐв Г. А., Бельтенѐв В. Е., Егоров И. В., Ермакова Л. А., Колчина Н. Л., Кондратенко А. В., Фирстова А. В., Сотникова А. С. Геологоразведочные работы на глубоководные полиметаллические сульфиды в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта: результаты исследований в Российском разведочном районе // Океанологические исследования. 2023. Т. 51, № 4. С. 167–185.

11. Kondratenko A. V., Egorov I. V., Ivanov V. N., Kell D. L., Stepanova M. S. Physical-mechanical properties of the bottom formations of the hydrothermal ore fields on the Mid-Atlantic Ridge. The Proc. of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference. Sapporo, Japan, June 10–15, 2018. P. 106–111.

12. Melnikov M. E., Pulyaeva I. A., Sedysheva T. E., Ivanov V. V. Physical and mechanical properties of Fe-Mn crusts and their underlying rock substrates // Economical, Technological and Environmental Aspects: Cooperative Solutions for Future Deep-sea Mining. 46th Underwater Mining Conference 24–29 September 2017. Berlin, Germany.

ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Константинова Н. П.¹, Якубович О. В.^{2,3}, Черкашѐв Г. А.^{1,2}

¹ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: NPKonstantinova@gmail.com

Интерес к океанскому железомарганцевому оруденению, проявленному преимущественно в виде гидроксидных корок и конкреций, обусловлен перспективами его промышленного освоения. Корки обогащены целым рядом полезных компонентов, таких как Co, Mn, Ni, Nb, Te, Bi, Mo, W, Pt, Th и редкоземельные элементы (РЗЭ) [1]. Скопления корок известны в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах. Наиболее крупные поля сосредоточены в пределах глубоководной рудной провинции северо-западной приэкваториальной зоны Тихого океана [1, 2]. Наименее изученным районом остается Северный Ледовитый океан (СЛО), что связано с техническими сложностями и большими финансовыми затратами на проведение геологоразведочных и научных работ в полярных широтах.

В связи с активизацией работ, направленных на сбор материалов по проблеме расширения границ континентального шельфа Российской Федерации, был проведен ряд экспедиций в глубоководной части Арктики, в которых были подняты образцы железомарганцевых образований (ЖМО). Таким образом, начиная с 2012 г. проводятся научные исследования ЖМО глубоководной акватории Арктики, которые можно разделить на несколько этапов.

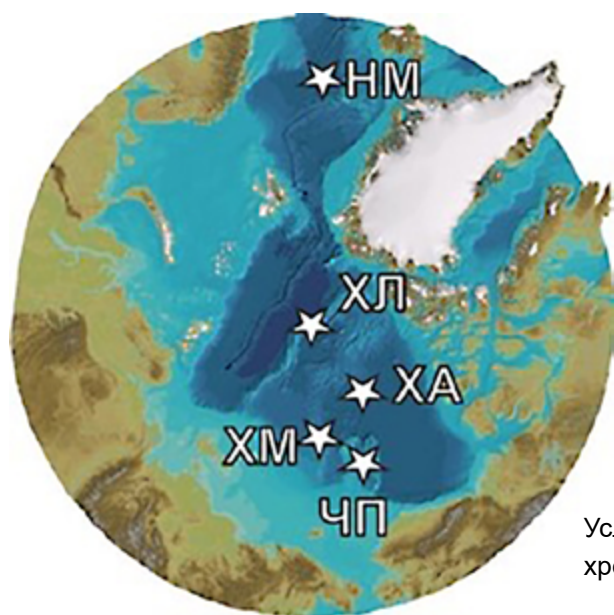
На первом этапе исследовались ЖМО, которые были подняты с хребта Менделеева и позволили впервые получить данные о морфологии, составе и особенностях процесса формирования ЖМО глубоководной Арктики [3, 4]. Для расширения географии исследований, в частности для сравнительной характеристики корок хребта Менделеева с корками Чукотского поднятия и хребта Альфа, поднятыми в рамках американских арктических рейсов, исследования проводились в коллаборации с учеными из Геологической службы США. Результаты показали, что корки хребта Менделеева, Чукотского поднятия и хребта Альфа имеют сходный вещественный состав, что позволяет выделять их в качестве особого типа железомарганцевых образований, характерного для арктического Американо-Азиатского бассейна.

Дальнейшие исследования коллекции ЖМО Американо-Арктического бассейна включали изучение распределения элементов в минеральных фазах по результатам селективного выщелачивания, что позволило установить связь полезных компонентов ЖМО (Mn, Co, Ni, REE) и химических элементов (Sc, As, Li, Th и V), обогащающих корки Американо-Арктического бассейна СЛО, с различными минеральными фазами, в частности марганцевыми оксидами, железистыми гидроксидами и алюмосиликатами [5].

По результатам химического выщелачивания образцов выявлено, что среднее содержание терригенного материала в корках составляет 25,3%, что значительно превышает среднее содержание в глубоководных гидротермальных корках (12%). Эта особенность состава арктических ЖМО инициировала проведение исследований, посвященных определению источников терригенного вещества в глубоководной Арктике. Терригенный материал, извлеченный из корок хребтов Альфа и Менделеева и Чукотского поднятия, различается по изотопному составу Sr, Nd и Pb, что отражает разное соотношение его поступления из районов Северной Америки и Северо-Восточной Сибири, меняющееся во времени [6].

С целью характеристики ЖМО всего СЛО были привлечены образцы ЖМО Евразийской части и Норвежского моря, в частности отрога Воринга и хребта Книповича. Были проведены послойное определение возраста осмиевым методом и послойное определение основных и редких элементов в корках, что позволило определить основные палеоклиматические изменения региона и оценить гидрохимию СЛО на протяжении последних 7 млн лет. Результаты определения изотопов железа в слоях корок дали понимание об источнике железа и его изменениях во времени [7].

Таким образом, железомарганцевые корки были обнаружены на многих крупных структурах СЛО, что позволяет предположить их широкое распространение в Арктике.



Результаты исследований ЖМО Арктики показали, что по морфологическим признакам все корки СЛО характеризуются схожими структурами поверхности (от ботриоидальной до гладкой) и слоистым внутренним строением. Количество

Проявления железомарганцевой минерализации в пределах СЛО.

Условные обозначения: НМ — Норвежское море; ХЛ — хребт Ломоносова; ХА — хребт Альфа; ХМ — хребт Менделеева; ЧП — Чукотское поднятие

макрослоев, наблюдаемых в корках, варьируется от 1 до 4. Мощность корок варьируется в больших пределах (от первых сантиметров до 80 см) и отражает локальные гидродинамические особенности района. Основными минералами корок являются слабо раскристаллизованные оксиды и гидроксиды марганца и железа, представленные преимущественно Fe-вернадитом и гетитом, в меньшей степени — ферроксигитом и бернесситом.

Отмечается сходство химических составов корок СЛО и их резкое отличие от хорошо изученных гидрогенных корок Тихого океана. В первую очередь корки СЛО характеризуются высоким содержанием терригенного материала, который варьируется от 7 до 54% в разных слоях, но, как правило, имеет тенденцию к уменьшению количества с возрастом. Это влияет на концентрацию полезных компонентов, снижая их общее содержание. Отношение Fe/Mn в корках значительно выше тихоокеанских и варьируется от 1,6 до 3,9. Средние содержания рудных элементов составляют: Mn — 7,7; Co — 0,14; Ni — 0,23. Наблюдается тенденция к повышению содержаний большинства элементов, включая марганец и кобальт, с уменьшением расстояния до Северной Атлантики, что отражает значительное влияние глубинных атлантических вод — источника растворенных металлов для образования корок. Суммарное содержание РЗЭ в среднем составляет 0,16%. Особенностью арктических корок являются высокие содержания скандия, которые в среднем составляют 47 г/т, но могут достигать 66 г/т, хотя скандий — рассеянный элемент и редко образует столь высокие концентрации. Результаты селективного выщелачивания показали, что Sc преимущественно накапливается в железистой фазе.

Результаты изучения микроструктур, минерального состава, особенностей распределения РЗЭ в корках дали возможность определить механизм их формирования, в ходе которого доминировали два основных фактора — медленное осаждение железомарганцевой массы путем сорбции элементов из водной толщи с локальными импульсами поступления терригенного материала за счет ледового разноса.

Кроме гидрогенных корок, в СЛО были обнаружены фрагменты гидротермальных железомарганцевых образований, поднятых на нескольких станциях на Чукотском поднятии и на хребте Менделеева. Данные образования в значительной мере отличаются морфологически и вещественно от вышеописанных гидрогенных корок. На гидротермальное происхождение данных образований указывает их минеральный и химический состав.

Можно выделить два типа гидротермальных образований. Первый представлен чередованием желто-коричневых и темно-коричневых слоев, которые преимущественно состоят из оксидов железа, но темно-коричневые слои имеют более высокое содержание марганцевых оксидов. Другой тип представляет собой брекчию с плохо отсортированными преимущественно угловатыми или почти угловатыми обломками, представленными фрагментами базальта и измененными

метаосадочными породами. Цемент брекчии выполнен преимущественно гидроксидами железа темно-коричневых цветов.

Для определения возраста гидротермальной активизации был применен U-Th-He метод для датирования гетита с использованием нового аналитического подхода, в частности включающего запечатывание образцов в кварцевые ампулы [8].

(U,Th)-He-возраст гетита цемента и жил гидротермальной железомарганцевой минерализации с Чукотского поднятия показал хорошую воспроизводимость, демонстрируя возраст $8,6 \pm 0,3$ млн лет ($n=4$) и $4,8 \pm 0,4$ млн лет назад ($n=2$), соответственно. Эти данные свидетельствуют о формировании низкотемпературных гидротермальных образований в неогеновый период. По мнению авторов, гидротермальная минерализация могла формироваться под поверхностью морского дна в разломных зонах, характеризующихся повышенной проницаемостью, которая способствовала циркуляции рудоносных флюидов и минералообразованию. Геотермический градиент обеспечивал необходимую температуру флюидов для формирования оксидов железа и марганца, а дальнейшие тектонические процессы приводили к выводу пород с гидротермальной минерализацией на поверхность морского дна.

Исследование поддержано грантом РФФ 22-77-10088.

Список литературы

1. Hein J. R., Koschinsky A. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules // Treatise on Geochemistry. 2nd ed. 2014. P. 273–291.
2. Андреев С. И., Аникеева Л. И., Казакова В. Е. и др. Кобальтбогатые руды Мирового океана. СПб.: ФГУП ВНИИОкеангеология, 2002. 167 с.
3. Константинова Н. П., Черкашёв Г. А., Новиков Г. В. и др. Железомарганцевые корки поднятия Менделеева: особенности состава и формирования // Арктика: экология и экономика. 2016. № 3 (23).
4. Konstantinova N., Cherkashov G., Hein J. R. et al. Composition and characteristics of the ferromanganese crusts from the western Arctic Ocean // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 87. P. 88–99.
5. Konstantinova N., Hein J. R., Gartman A. K. et al. Mineral phase-element associations based on sequential leaching of ferromanganese crusts, Amerasia Basin Arctic Ocean // Minerals. 2018. Vol. 8. P. 460. DOI: 10.3390/min8100460.
6. Konstantinova N., Hein J. R., Mizell K., Cherkashov G., Dreyer B., Hutchinson D. R. Changes in sediment source areas to the Amerasia Basin, Arctic Ocean, over the past 5.5 million years based on radiogenic isotopes (Sr, Nd, Pb) of detritus from ferromanganese crusts // Marine Geology. 2020. Vol. 428. P. 106280.
7. Konstantinova N., Suzuki K., Chang Q., Makabe A., Hein J. R., Brekke H. & Skolotnev S. Environmental Changes in the Arctic over the Past 10 Myr Based on Os Isotope Stratigraphy and Chemical Composition of Ferromanganese Crusts. Goldschmidt 2023. 19404. doi.org/10.7185/gold2023.19404.
8. Yakubovich O. V., Konstantinova N. P., Anosova M. O., Podolskaya M. M., Adamskaya E. V. Short communication: New analytical approach on (U-Th)/He dating of Fe-hydroxide with an example using goethite from the Amerasian Basin, Arctic Ocean, EGU sphere [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-992>, 2024.

«РОССИЙСКОЕ МОГУЩЕСТВО ПРИРАСТАТЬ БУДЕТ» БОГАТСТВАМИ МИРОВОГО ОКЕАНА: ДВОЙНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ДВУХПАЛУБНОЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ МБПК И ЕГО ТЕХНОЛОГИЙ

Кулагин Б. П.

Технико-внедренческий центр, «Фонд Байбакова», Москва, Россия
E-mail: kulbor@bk.ru

Ключевые слова: добыча минеральных ресурсов дна Мирового океана, воздействие на экологию при добыче минерального сырья на дне, редкоземельные материалы (РЗМ) и геологоразведка на дне океана, экология дна Мирового океана, многофункциональный катамаран (МБПК), всплывающий пробоотборник, глубоководный морской пробоотборник (Deep Sea Probe — DSP), мобильный глубоководный пробоотборник (МГП/MDSP), «гидрокосмос».

В тезисах к одной из будущих публикаций говорится:

«Редакция „Корабел.ру“ попросила Георгия Черкашёва рассказать, на какой стадии находится процесс реализации страной взятых на себя обязательств и чего ожидать в обозримом будущем. Эксперт пояснил, что в настоящее время подготовлен федеральный проект „Освоение минеральных ресурсов Мирового океана“. Проект разработан в Минприроды и после согласования с остальными ведомствами будет передан в правительство. Ожидается, что это произойдет в этом году. Таким образом, именно новый, 2024-й должен стать судьбоносным в деле освоения месторождений полезных ископаемых океанского дна».

«В случае если правительство одобрит и финансово поддержит этот проект, то работа двинется по всем направлениям: геологическому, технологическому, экологическому и образовательному. Тогда все наши контрактные обязательства перед Международным органом по морскому дну (МОМД) в части разведочных работ будут выполнены и Россия сможет перейти к стадии добычи глубоководных полезных ископаемых», — сказал эксперт.

По словам Георгия Черкашёва, экономический эффект от всех этих усилий можно ожидать приблизительно через 10 лет, когда будут закончены контрактные

геологоразведочные работы и начнут реализовываться контракты по добыче океанских минеральных ресурсов.

Столь детальное изложение важности и, в определенном смысле, зависимости будущего развития мировых технологий было дано авторами, чтобы подчеркнуть реальное положение дел в этой области, а именно: «В ближайшие десятки лет ресурсы полезных ископаемых на суше будут исчерпаны».

Это одна, но не единственная причина необходимости освоения минеральных ресурсов океана, считает профессор СПбГУ Георгий Черкашёв. По его мнению, «добываются всё более бедные руды, Мировой океан же несравнимо богат по содержанию компонентов: меди, золота, марганца и других, включая РЗМ. Чтобы извлечь со дна то же количество металла, нужно меньшее количество руды — это более выгодно с точки зрения добычных процессов».

«Что касается абиссальных равнин, океанического ложа — это, казалось бы, очень глубоко, далеко, и на глаз может показаться, что там жизни немного, но на самом деле там находится одна из самых богатых на планете экосистем с богатейшим видовым разнообразием. По некоторым оценкам, это сопоставимо с влажными тропическими лесами, где, как известно, самое высокое биологическое многообразие, только на суше. А в океане это коралловые рифы и глубоководные экосистемы», — отмечает доктор биологических наук, руководитель Лаборатории донной фауны океана, главный научный сотрудник ИО РАН им. П. П. Ширшова Андрей Гебрук.

Что будет с океаном и его биологическим многообразием?

Экологический аспект — важнейшая составная часть проектов освоения глубоководных минеральных ресурсов. Обеспечение баланса между экономической целесообразностью и экологией — основная задача МОМД, который контролирует проведение разведочных, а в дальнейшем — добычных работ.

«Во всем мире в настоящее время ведется обширная работа по изучению вариантов смягчения воздействия глубоководной добычи на окружающую среду. В США Национальное управление океанических и атмосферных исследований провело разведочные и картографические работы у побережья Гавайских островов. Европейский союз внес миллионы долларов в такие проекты, как MIDAS (Управление воздействиями глубоководных ресурсов) и Blue Mining, международный консорциум из 19 отраслевых и исследовательских организаций», — сообщает издание The Guardian.

Специалисты из области геологии утверждают, что, «учитывая локальные размеры потенциальных месторождений — в особенности это касается сульфидных руд с размерами рудных полей в первые сотни метров, — воздействие на окружающую среду будет иметь локальный характер. Ущерб будет очень небольшим, прежде

всего из-за эффекта масштаба. Участки отработки на дне несоизмеримо малы по сравнению с общими размерами дна Мирового океана».

Однако экологи во всем мире всерьез обеспокоены: они опасаются, что вмешательство представляет потенциальную опасность на гомеостатический баланс биосферы дна Мирового океана, поскольку оно играет важную роль в биосфере Земли: регулирует глобальные температуры, хранит углерод и обеспечивает среду обитания для огромного множества живых существ.

Промышленность развивается быстрее, чем наука. Поэтому ученые настаивают на том, что, прежде чем начинать какую-либо промышленную активность, нужно лучше изучить глубоководный мир, о котором мы крайне мало знаем.

«Жизнь на Земле зависит от океана, он производит и существенную долю кислорода на планете, и огромную биологическую продукцию. Если это все нарушить, последствия будут непредсказуемыми. И это будет посерьезнее, чем любые карьерные разработки на суше или даже давно ведущийся промысел на шельфе. Там всё ближе и понятней, поэтому легче контролировать. Мы видим, что там происходит. Мы знаем про катастрофы, которые там случаются, и их последствия. И мы знаем, что эти системы хоть и за долгие годы, но восстанавливаются. А вот что произойдет на большой глубине, не знает никто, поэтому вторгаться в систему, которую мы еще не изучили и не поняли, — смертельно опасно для человечества».

Для контроля данных, получаемых с помощью подводной телевизионной съемки, и проведения лабораторных исследований конкреций в последнее время пробы донного материала начали собирать с помощью свободно падающих самовсплывающих грейферных пробоотборников (<http://underwater.su/books/item/f00/s00/z0000042/st015.shtml>).

«Длительность цикла получения пробы таким устройством с глубины 5000 м составляет около 2,5 ч при скорости подъема пробоотборника на поверхность примерно 1,2 м/с. Снос пробоотборника от точки сбрасывания лежит в пределах 0,6–4 км. Для поиска всплывшего пробоотборника, кроме визуальных средств, обычно используют радиопеленгаторы, позволяющие обнаруживать пробоотборники при волнении моря до 5 баллов на расстоянии около 30 км».

Для современных технологий задача поиска всплывающего пробоотборника является тривиальной, а предлагаемая авторами технологии система поиска и подъема пробоотборника, имеющего собственную автономную систему позиционирования в заданную область поверхности воды, не является технической проблемой.

Из приведенной выше информации можно заключить, что, «если какая-то из стран научится быстро и дешево, а главное, с минимальным воздействием на экологию

добывать полезные ископаемые на огромной территории в Мировом океане, она станет мировым лидером».

Надо отметить, что Россия существенно отстает в части геологоразведки, не говоря уже о работе по уже разведанным месторождениям. Однако, по словам кандидата технических наук, директора Технико-внедренческого центра «Фонда Байбакова» Бориса Кулагина, Россия не практикует варварские методы добычи полезных ископаемых из океанских недр.

«У нас всего один процент разведки на фоне всех прочих стран. Таких, как США, Канада, Китай... впрочем, КНР тоже не на первых ролях. Лидеры в этом — англосаксы. Но у них свой подход. Они хотят поднять „культурный слой“ грунта вместе с конкрециями, поднимать его на поверхность и из него уже выделять, что им представляется для себя полезным. Такое вот варварство. Кроме того, что это энергетически глупо — поднимать с глубины нескольких километров сотни, тысячи тонн грунта, это еще и ведет к уничтожению того, что формировалось миллиарды лет».

Поэтому действительно мировыми лидерами имеют шанс стать те, кто найдет способы быстро, дешево и, что не менее важно, экологически безопасно поднимать глубоководные минеральные ресурсы. «Что касается шансов России в этой гонке, то интеллектуальный потенциал у нас позволяет достигнуть самых высоких успехов в изучении Мирового океана и освоения его богатств, — говорит Борис Кулагин. — Мы даже космос знаем лучше, чем Мировой океан. Так что успехи в его освоении будут сопоставимы с высшими достижениями человечества, как то полет в космос и расщепление атома. Все упирается, как всегда, в финансирование науки».

Одним из путей решения задачи освоения минеральных ресурсов Мирового океана является технология, основанная на концепции глубоководных морских пробоотборников (Deep Sea Probe — DSP), и создание на этой основе прототипа автономных донных роботов-пробоотборников, действующих в составе «роя», базирующегося на многофункциональном катамаране (многофункциональный балластируемый полупогруженной катамаран — МБПК) двойного назначения (<https://vk.com/@kulborboris-ekologicheskii-bezopasnyi-metod-osvoeniya-mineralnyh-resursov>).

ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОЕ ОСВОЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ДНА МИРОВОГО ОКЕАНА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БАЛЛАСТИРУЕМОГО ПОЛУПОГРУЖЕННОГО КАТАМАРАНА И РОБОТИЗИРОВАННЫХ «РОЕВ» ГЛУБОКОВОДНЫХ ПРОБООТБОРНИКОВ

Кулагин Б. П.¹, Староверов Б. А.², Назметдинов И. М.³

¹ Технико-внедренческий центр, «Фонд Байбакова», Москва, Россия

² Костромской государственной университет, Кострома, Россия

³ Штаб МТО ВС РФ, Москва, Россия

E-mail: kulbor@bk.ru

Предлагается исключить негативное воздействие существующих методов тотального снятия донного грунта при добыче полезных ископаемых на дне Мирового океана на его экосистему. Решение этой задачи возможно путем применения роботизированных «роев» глубоководных морских пробоотборников, созданных на основе Deep Sea Probe — DSP (<https://prom-ts.com/proizvodstvo/DSP.html>), базирующихся на нижней палубе многофункционального балластируемого полупогруженного катамарана (МБПК) двойного назначения и под его защитой при поиске, добыче и доставке ценных редкоземельных материалов (РЗМ) (рис. 1).

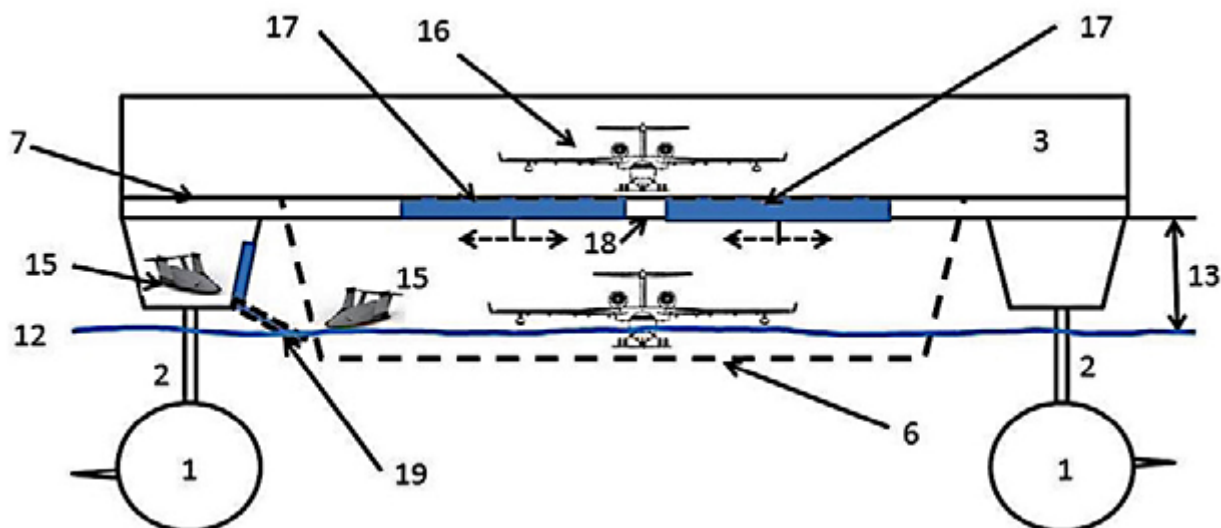


Рис. 1. Функциональная схема концепта МБПК (разрез вида спереди) в составе: подповерхностные понтоны (1), стойки (2), «пенал» (3), уровень ватерлинии (12) в пределах вертикального клиренса (13); амфибийные ЛА типа А-40 (16) сходят и заходят через кормовую аппарель (6) и экранокатера (15) в пилотируемом и беспилотном вариантах (вариант схода через герметизируемый проем (19)). На нижней палубе (7) размещен грузовой проем (18) с закрытием в виде раздвижных герметизируемых дверей (17)

Известные результаты экспериментов системы эрлифта показали общую удовлетворительную ее работы, «производительность которой достигала 60 т/ч, а также обеспечивала непрерывную добычу в штормовых условиях при скорости ветра 55 км/ч и высоте волн 4–5 м». При использовании технологии МБПК эти условия могут быть расширены до уровня волнения 7–8 баллов, делая всю технологию практически всепогодной.

На рисунке 2 показана схема размещения на нижней палубе МБПК прототипов «роев» мобильных глубоководных пробоотборников (МГП/MDSP) на основе глубоководных морских пробоотборников (DSP).

Концепция «роев» DSP и создаваемая на их основе роботизированная система мобильных глубоководных пробоотборников (МГП) могут стать основой для экологически безопасной технологии будущего освоения «гидрокосмоса», которая по своей сложности и актуальности, по мнению авторов, не уступает технологиям, созданным ранее при освоении космического пространства.

Применение концепции и технологии МБПК в системе МГП может успешно использоваться в задачах освоения минеральных ресурсов дна Мирового океана

Схема размещения глубоководных морских пробоотборников (Deep Sea Probe – DSP) на борту МБПК (разрез не в масштабе)

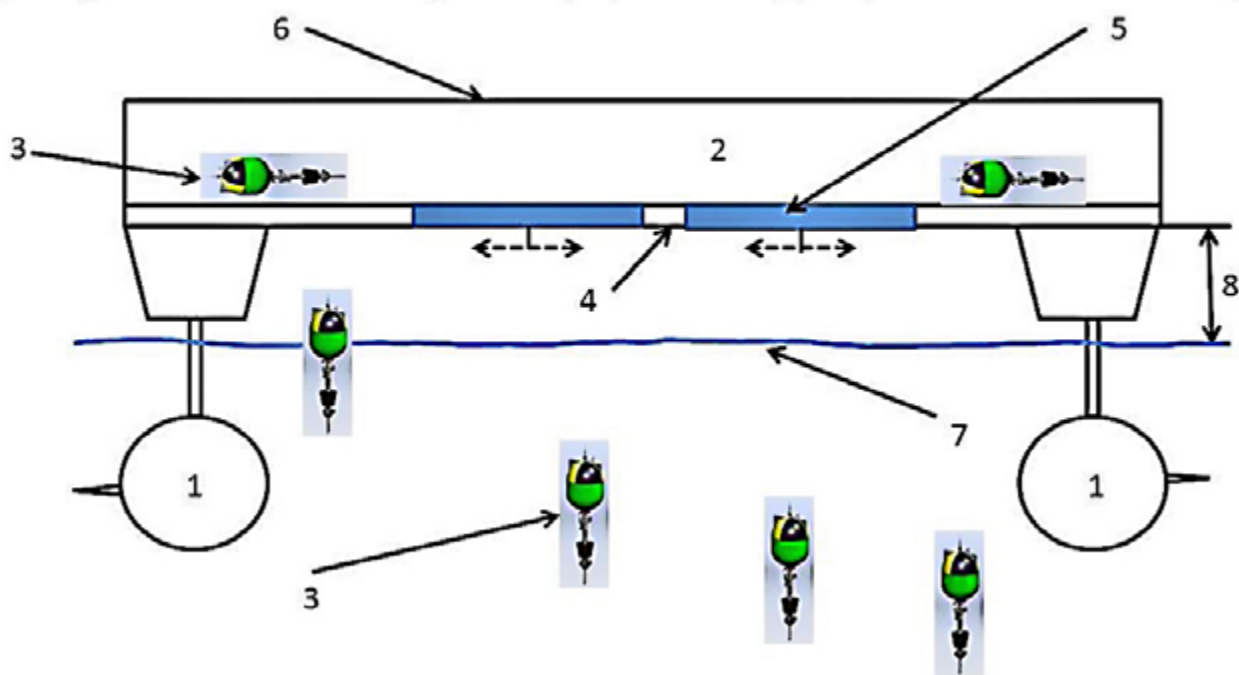


Рис. 2. На схеме показаны: глубоководные морские пробоотборники (Deep Sea Probe — DSP) (3), расположенные на нижней палубе в «пенале» МБПК (2); герметизируемый проем (4), через который производится массовый сход пробоотборников на поверхность воды (7) в межкорпусное пространство катамарана, ограниченное габаритами и размерами верхней палубы (6), расстоянием между подповерхностными корпусами (1) и вертикальным клиренсом (8)

в качестве морской универсальной платформы и «шасси» (<https://vk.com/@kulborboris-ekologicheskii-bezopasnyi-metod-osvoeniya-mineralnyh-resursov>). При этом обеспечивается совмещение задачи геологоразведки, отбора и обогащения РЗМ с оперативной доставкой ценных материалов в заданную точку самолетами палубной авиации под прикрытием авиакрыла МБПК, располагающегося на верхней палубе (на схеме не показано), что является актуальным в современных условиях акватории Мирового океана.

ОЦЕНКА РЕСУРСОВ И ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ РУДЫ И МЕТАЛЛОВ В ПРЕДЕЛАХ РОССИЙСКИХ РАЗВЕДОЧНЫХ РАЙОНОВ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ И КОБАЛЬТОНОСНЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРОК НА ОСНОВЕ РОССИЙСКОЙ КЛАССИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ПОЛОЖЕНИЙ CRIRSCO

Лыгина Т. И., Хулапова Т. М.

ГНЦ АО «Южморгеология», Геленджик, Россия
E-mail: KhulapovaTM@rusgeology.ru

В соответствии с контрактами на разведку, заключенными с Международным органом по морскому дну (МОМД), силами ГНЦ АО «Южморгеология» проводятся геологоразведочные работы в пределах двух российских лицензионных участков, находящихся в Тихом океане: с 2001 г. — в Российском разведочном районе железомарганцевых конкреций (РРР-ЖМК), расположенном в зоне Клариион-Клиппертон и состоящем из Восточного и Западного полигонов общей площадью 75 000 км², и с 2015 г. — в Российском разведочном районе кобальтоносных железомарганцевых корок (РРР-КМК), локализованном в районе Магеллановых гор и состоящем из 150 блоков, сгруппированных в девять кластеров общей площадью 3000 км².

За прошедшее время на площади Восточного полигона РРР-ЖМК, как наиболее перспективной его части, выполнены комплексные площадные поисково-разведочные (оценочные) работы, в том числе с целью локализации ресурсов. В 2017 г. в пределах первого пятилетнего блока выделенного добычного района начаты ГРП следующей, разведочной стадии. К настоящему времени разведочные работы выполнены на трех смежных участках общей площадью 1610 км² и продолжаются на четвертом участке площадью 1131 км² (рис. 1). К концу 2024 г. работы на данном участке будут завершены, и площадь, покрытая разведочными работами, составит 2741 км².

На площади РРР-КМК в 2018 г. полностью завершены поисковые геологоразведочные работы и оценены ресурсы категории P_2 . В том же 2018 г. начато выполнение ГРП оценочной стадии, которые к настоящему времени проведены на трех кластерах общей площадью 1100 км² (рис. 2). Для этих участков оценены ресурсы категории P_1 .

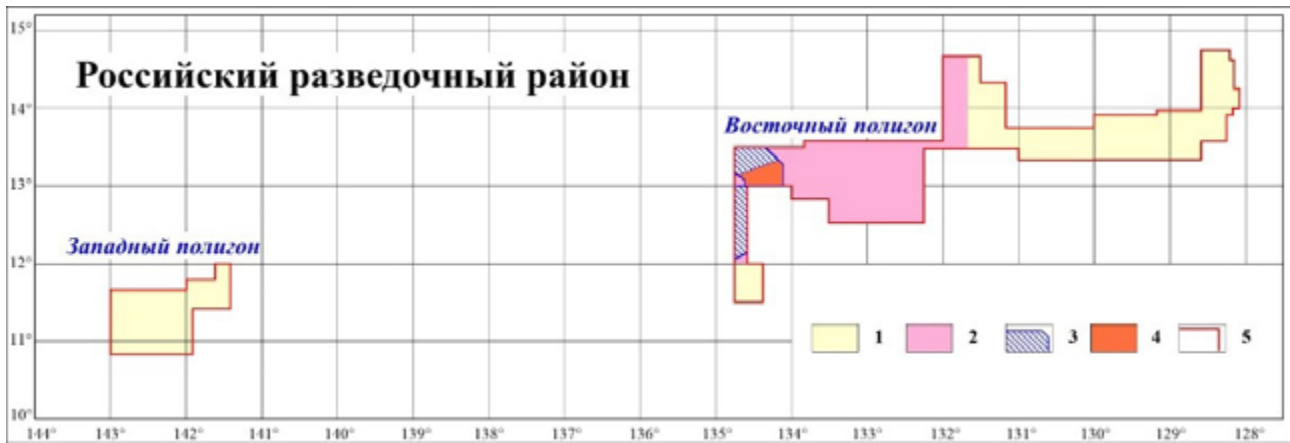


Рис. 1. Распределение категорий ресурсов и запасов железомарганцевых конкреций на площади РРР-ЖМК:

1 — участки, оцененные по категории «предполагаемые ресурсы» (Inferred mineral resources); 2 — участок, оцененный по категории «выявленные ресурсы» (Indicated mineral resources); 3 — участок, выбранный для изучения и подсчета запасов категории «измеренные ресурсы» (Measured mineral resources); 4 — участок, запасы которого подсчитаны по категории «измеренные ресурсы» (Measured mineral resources); 5 — граница РРР-ЖМК

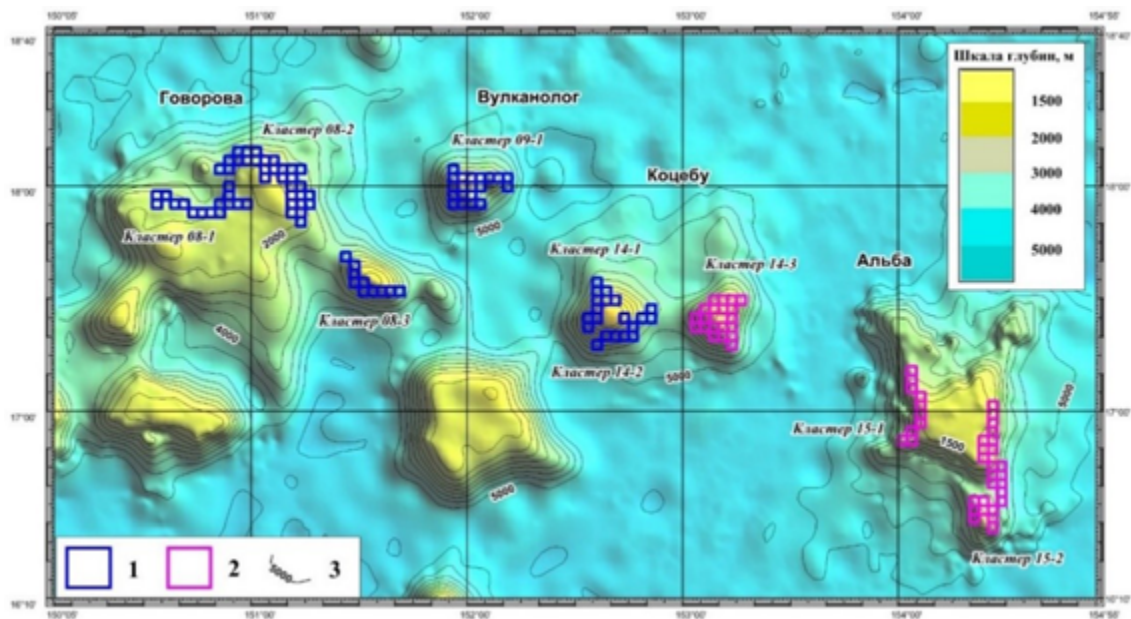


Рис. 2. Схема расположения блоков и кластеров РРР-ЖМК на гайотах Магеллановых гор Тихого океана:

1, 2 — блоки и кластеры РРР-ЖМК, с указанием степени изученности кластеров: 1 — выполнены ГРП поисковой стадии, оценены ресурсы категории P_2 (аналог в системе CRIRSCO отсутствует); 2 — выполнены ГРП оценочной стадии, оценены ресурсы категории P_1 («предполагаемые ресурсы», Inferred mineral resources); 3 — изобаты сечением 500 м

На остальных шести кластерах оценочные работы планируется завершить в 2024 г. Кроме того, в рамках подготовки к выполнению в РРР-КМК работ разведочной стадии на одном из кластеров выполнены соответствующие опытно-методические детальные геолого-геофизические работы с подсчетом запасов категории C_2 , результаты которых также будут представлены в конце 2024 г.

В рамках геологоразведочных работ, выполняемых в Российских лицензионных (разведочных) районах, геологическими заданиями по объектам предусматривается:

- оценка ресурсного потенциала с выделением на оконтуренных залежах конкреций эксплуатабельных участков (блоков) и подсчетом их запасов — в РРР-ЖМК;
- оценка прогнозных ресурсов категории P_1 — в РРР-КМК.

При этом в обоих случаях, в соответствии с указанными контрактами на разведку, оценка прогнозных ресурсов и подсчет запасов должны быть осуществлены в соответствии с требованиями руководящих рекомендаций МОМД на основе положений, предусмотренных шаблоном CRIRSCO. Взаимоотношение категорий ресурсов и запасов ТПИ классификационных систем РФ и CRIRSCO устанавливается на основе документа «Руководство по гармонизации стандартов отчетности России и CRIRSCO» (рис. 3).

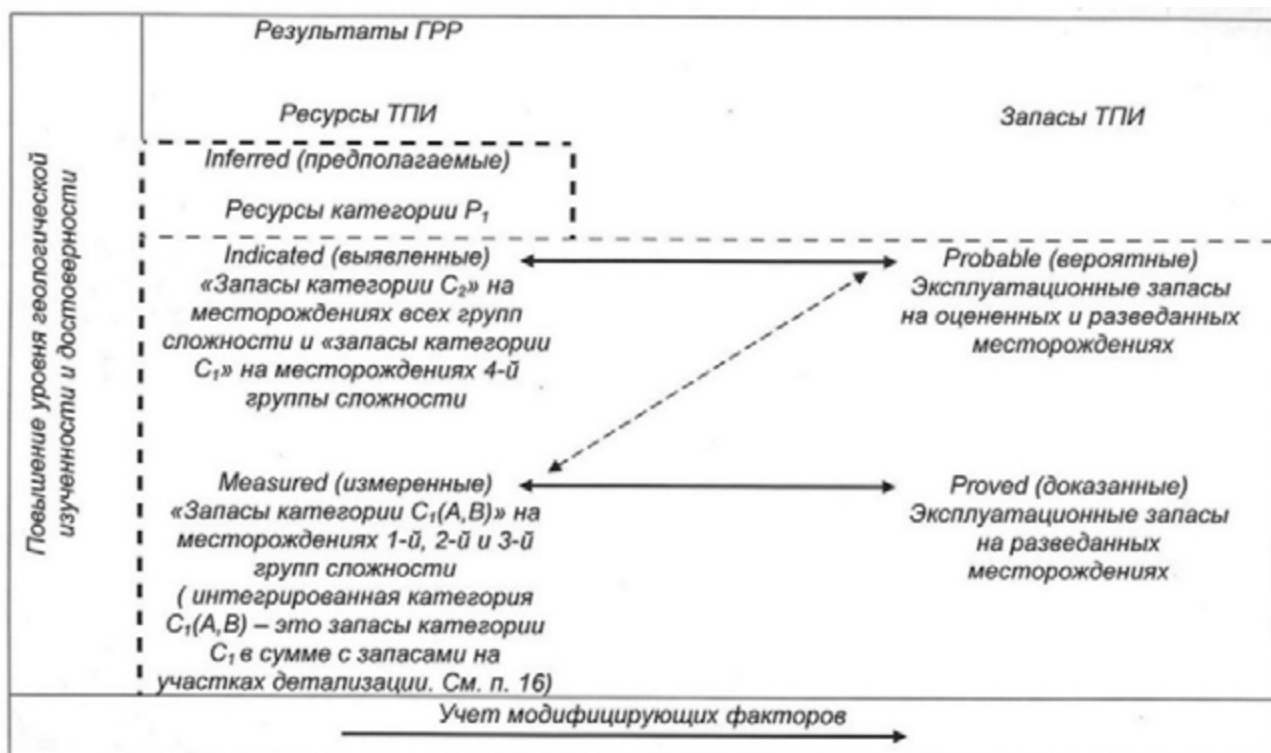


Рис. 3. Взаимоотношения категорий ресурсов и запасов ТПИ классификационных систем России и CRIRSCO [Российский Кодекс..., 2014, Руководящие рекомендации контракторам..., 2015]

В соответствии с российской классификационной системой запасы ТПИ по степени изученности подразделяются на категории C_1 и C_2 , прогнозные ресурсы по степени их обоснованности — на категории P_1 , P_2 и P_3 . В соответствии с классификацией CRIRSCO минеральные запасы подразделяются на вероятные (Probable mineral reserves) и доказанные (Proved mineral reserves), а минеральные ресурсы — на «предполагаемые» (Inferred mineral resources), «выявленные» (Indicated mineral resources) и «измеренные» (Measured mineral resources). При этом Стандарт отчетности МОМД предусматривает прямую связь между «выявленными ресурсами» (Indicated mineral resources) и «вероятными запасами» (Probable mineral reserves), а также между «измеренными ресурсами» (Measured mineral resources) и «доказанными запасами» (Proved mineral reserves). При этом перевод минеральных ресурсов в категорию минеральных запасов в системе CRIRSCO требует учета модифицирующих факторов (см. рис. 3).

Понятие «модифицирующие факторы» включает горнотехнические, технологические, экономические, конъюнктурные, правовые, экологические, социальные и административно-управленческие аспекты, к числу особо важных факторов относятся разубоживание и потери при добыче, учитываются также такие специфические факторы, как погода, транспортировка, подводная топография и режим использования доходов. Таким образом, выполнение подсчета запасов океанических ТПИ по категориям «вероятные» и «доказанные» (Probable и Proved mineral reserves) в пределах добычных районов требует разработки технологии добычи ТПИ и проведения опытной добычи, по результатам которой будут определены модифицирующие факторы. Иными словами, без проведения опытной добычи подсчет запасов по этим категориям осуществлен быть не может.

В соответствии с «Руководством по гармонизации стандартов отчетности России и CRIRSCO» запасы категории C_1 в системе CRIRSCO могут быть квалифицированы как запасы «вероятные» (Probable) или «доказанные» (Proved) только в случаях, когда модифицирующие факторы определены в полном объеме с высоким уровнем надежности. Аналогичным образом, только в этих случаях запасы категории C_2 в системе CRIRSCO могут быть квалифицированы как «вероятные» (Probable) запасы (см. рис. 3). В остальных случаях запасы категории C_1 и C_2 квалифицируются лишь как ресурсы: C_1 — как «измеренные» (Measured), а C_2 — как «выявленные» (Indicated). Ресурсы категории P_1 , оцененные по результатам оценочных работ, квалифицируются как ресурсы «предполагаемые» (Inferred) и могут быть переведены только в ресурсы «выявленные» (Indicated) по результатам разведочной стадии. Ресурсы категории P_2 , оцененные по итогам поисковой стадии, в системе CRIRSCO аналогов не имеют.

Определение величин подсчетных параметров при оценке ресурсов и подсчете запасов методически является единообразным независимо от того, в какой из

классификационных систем оно осуществляется. Поэтому, в соответствии с принятыми методическими рекомендациями по оценке прогнозных ресурсов и подсчету запасов железомарганцевых конкреций и кобальтоносных железомарганцевых корок дна Мирового океана (протокол № 23 заседания секции государственной политики и регулирования в области геологии и недропользования НТС Минприроды России от 11.12.2019, Москва), последовательно используется процедура оценки прогнозных ресурсов и подсчета запасов ЖМК и КМК в рамках классификационной системы РФ, а затем их перевод в категории шаблона CRIRSCO.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОСВОЕНИЯ РЕСУРСОВ МИРОВОГО ОКЕАНА ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МОРСКИХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ИХ ГРУПП

Маевский А. М., Занин В. Ю., Печайко И. А.

АО «НПП ПТ «Океанос», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Maevskiy_andrey@mail.ru

Искусственный интеллект (ИИ) стал не только одной из самых динамично развивающихся областей технологий, оказывающей значительное влияние на различные сферы жизни человека, но и послужил «триггером» каскадных изменений технологических укладов. С его появлением возникли новые возможности в обработке данных, автоматизации процессов и создании когнитивных систем управления робототехническими комплексами, способными адаптироваться к разнообразным условиям окружающей среды и технологическим сценариям. Применение ИИ в том числе позволяет расширить спектр функциональных возможностей морских робототехнических комплексов (МРТК).

Необходимость развития морских робототехнических систем (МРТС) и, соответственно, МРТК как средств мониторинга состояния подводной среды в процессе освоения и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, особенно глубоководных и арктических, за рубежом и в России осознали достаточно давно [1–3]. Результатом такого осознания стало планомерное создание высокотехнологичных сопутствующих технологий и как таковых гибридных интервенционных аппаратов (в том числе и резидентного базирования), совмещающих функции традиционных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) с интегрированными автоматическими или автоматизированными манипуляторными комплексами (МК).

В 2016 г. «Океанос» запустил разработку автоматического подводного манипуляторного комплекса для НПА, а в 2018 г., наряду с мировыми лидерами развития резидентных технологий (таких как ICM Subsea & Technology, Oceaneering, Saab Seaeye и др.), АО «НПП ПТ «Океанос» разработало и испытало первый отечественный демонстратор технологии легкого интервенционного АНПА (ЛИ-АНПА) [4–8].

Данный демонстратор обладает всем необходимым базовым функционалом, в том числе пятиступенным автоматизированным манипуляторным комплексом

директорного и/или супервайзерного управления, что позволяет ЛИ-АНПА обеспечить автоматизированную работу и минимизировать участие оператора — к примеру, проводить при удержании заданной позиции манипуляции с инструментарием на панели управления или автономный пробоотбор грунта, что было неоднократно успешно продемонстрировано представителям НТИ «Маринет», ПАО «Газпром», ВМФ РФ, ФГУП «КНГЦ», Корпорации морского приборостроения (АО «Концерн НПО «Аврора» и АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), АО «СПМБМ «Малахит», МГТУ им. Н. Э. Баумана и многим другим на полунатурных испытаниях в условиях полигона морской робототехники ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ), развернутого в экспериментальном бассейне СПбГМТУ (рис. 1).

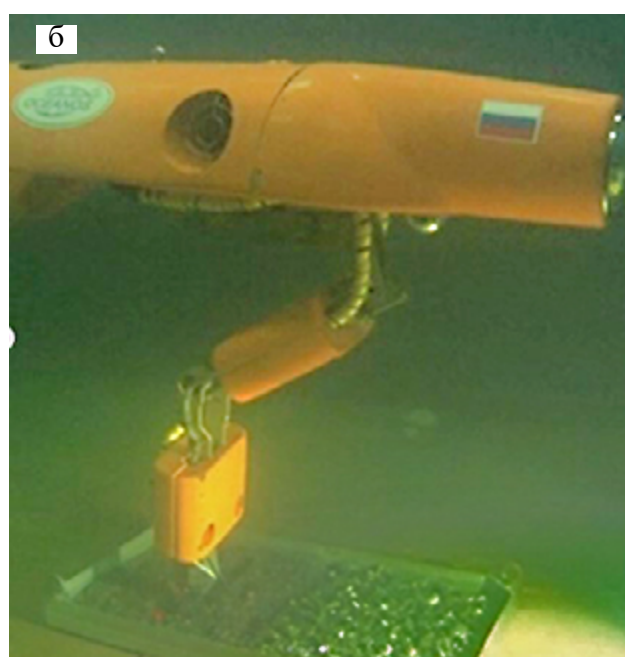


Рис. 1. Подводный глайдер и демонстратор технологии легкого интервенционного АНПА (ЛИ-АНПА) производства АО «НПП ПТ «Океанос» на стенде (а) и в экспериментальном бассейне СПбГМТУ (б)

Наряду с этим разработчики АО «НПП ПТ «Океанос» активно трудятся над практическими задачами синтеза объединенной когнитивной системы автоматического управления АНПА и МК с интеграцией технологии ИИ в автоматизированные подсистемы управления МРТК собственного производства. В частности, на данный момент авторами прорабатываются два направления реализации работ:

Решение задачи группового взаимодействия МРТК на основе интеллектуальных систем планирования. Интеллектуализация взаимодействия МРТК позволяет существенно увеличить качество и объемы накапливаемых данных, количество одновременно выполняемых задач и живучесть всей группы МРТК в целом. Разработанные технологии апробированы в ходе ряда натурных экспериментов, проведенных АО «НПП ПТ «Океанос» в период с 2021 по 2023 г. на макетах малых безэкипажных катеров (БЭК), перед которыми стояла задача проведения мониторинга и патрулирования заданной акватории [9] (рис. 2).



Рис. 2. Полномасштабные испытания группового движения макетов БЭК с учетом обхода препятствий

Интеллектуализация работы подводного манипуляторного комплекса. В основе данной работы лежит система технического зрения (СТЗ) на базе ИИ. В 2023–2024 гг. авторами успешно апробированы два исполнения лабораторно-бассейнового натурального робототехнического стенда, включающих конструкцию подводного электромеханического пятистепенного манипулятора на интегрированном имитаторе НПА/имитаторе среды. На конструкции подводного манипулятора был установлен модуль камеры Astra Pro Realsense RGBD Depth (или Intel Realsense, в зависимости от конфигурации), получающий изображение в формате RGB и пространственного облака точек (карты глубины). Обученная на основе собранных датасетов СТЗ имеет возможность не только детектировать тип объекта, но и производить классификацию, что позволяет САУ обеспечить оптимальную работу МК. Данная технология успешно протестирована в процессе стендовых испытаний в АО «НПП ПТ «Океанос» при работе с макетом рабочей панели ПДК и макетами рабочих инструментов (таких как HotStub и Torque Tool) (рис. 3).

Комплексное применение систем искусственного интеллекта и групп МРТК, оснащенных манипуляторными комплексами, интегрированными с программно-аппаратными комплексами картирования полезных ископаемых морского дна, в частности типа OpenSeaGeo (разработчик ООО «БиоГеоХаб») с использованием ИИ [10], представляет собой важный шаг в совершенствовании и автоматизации проведения морских геологоразведочных работ.

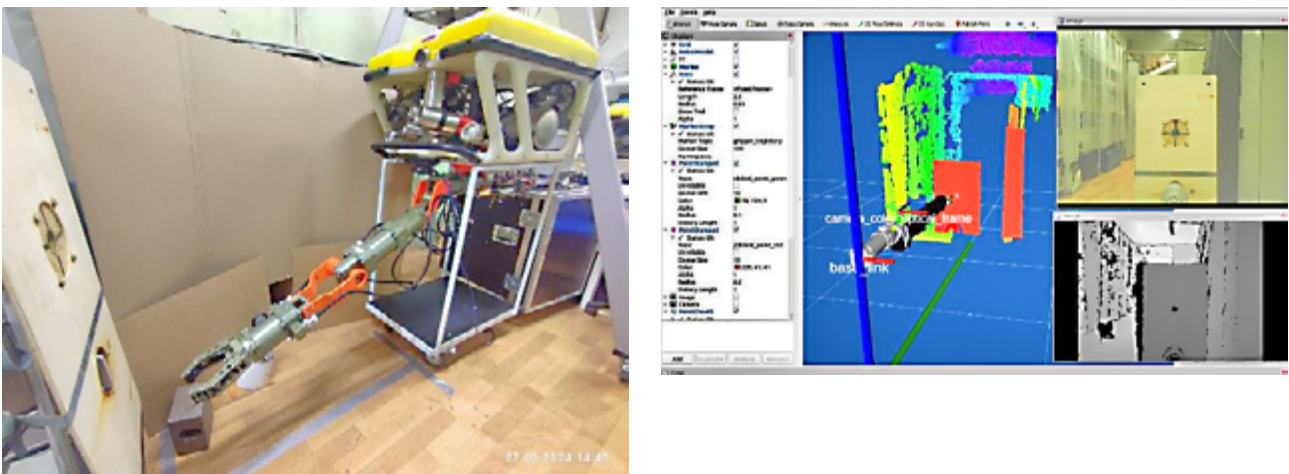


Рис. 3. Натурный робототехнический стенд МК и пример работы системы технического зрения, установленной на подводном манипуляторе производства АО «НПП ПТ «Океанос»

Использование ИИ может позволить оптимизировать стратегии сбора образцов, адаптируя их в реальном времени в зависимости от обнаруженных данных и условий окружающей среды. Это способствует более эффективному использованию ресурсов и увеличивает вероятность успешного выполнения задачи.

Группы подводных роботов, оснащенные МК, могут обеспечить доступ к труднодоступным областям морского дна, тем самым повышая потенциал обнаружения и мониторинга изменений в окружающей среде, что крайне важно для устойчивого управления морскими ресурсами.

Список литературы

1. <https://www.offshore-mag.com/subsea/article/16757224/resident-auv-system-with-subsea-dock-in-development>.
2. *Takumi Matsuda, Toshihiro Maki, Kotohiro Masuda, Takashi Sakamaki*. Resident autonomous underwater vehicle: Underwater system for prolonged and continuous monitoring based at a seafloor station Robotics and Autonomous Systems. 2019. Vol. 120. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.07.001>.
3. RU-NO Barents Project, Pipelines and Subsea Installations-Report, 6. June 2014. www.intsok.com.
4. *Занин В. Ю. Маевский А. М.* и др. Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий: Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2019 года. М.: Министерство энергетики Российской Федерации, ООО «Технодевелоп», 2019. С. 13–22.
5. *Маевский А. М.* и др. Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // Перспективные системы и задачи управления. Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» / Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. 481 с.
6. *Маевский А. М., Гайкович Б. А.* Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов // Вести газовой науки. 2019. № 2 (39). С. 29–40.
7. *Маевский А. М., Занин В. Ю., Кожемякин И. В.* Разработка комбинированной системы управления резидентным/интервенционным АНПА на основании поведенческих методов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 1 (211).
8. *Маевский А. М.* Разработка морских робототехнических комплексов с перспективой применения в качестве резидентной робототехники, на примере проектной работы по разработке линейки АНПА «глайдер — гибридный глайдер — I-AUV» // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых. Севастополь, 22–26 апреля 2019 г. С. 20–35.
9. *Nikushchenko D., Maevskiy A., Kozhemyakin I.* et al. Development of a Cascade Intelligent System for Path Planning of the Group of Marine Robotic Complexes // J. Mar. Sci. Eng. 2023. Vol. 11. P. 610. <https://doi.org/10.3390/jmse11030610>.
10. <https://rosrid.ru/ikrbs/detail/LDJZUBF2LHRF4ITH220WG47X>.

СОВРЕМЕННЫЕ И ДРЕВНИЕ СУЛЬФИДНЫЕ ЗАЛЕЖИ, СВЯЗАННЫЕ С ВНУТРЕННИМИ ОКЕАНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ: СХОДСТВА И ОТЛИЧИЯ

Мелекесцева И. Ю.

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
г. Миасс, Челябинская обл., Россия
E-mail: melekestseva-irina@yandex.ru

Современные океаны и древние складчатые пояса содержат сульфидные залежи, в той или иной мере связанные с мантийными породами. В работе проведен краткий сравнительный анализ этих объектов на примере Срединно-Атлантического хребта (САХ) и зоны Главного Уральского разлома.

Многие гидротермальные сульфидные поля САХ (например, Логачёв, Рейнбоу, Ашадзе, Семёнов, Ириновское и др.) [1–3] связаны с выходами внутренних океанических комплексов (ВОК), которые выводят на морское дно мантийные породы по разломам типа детачмент [4]. Их сложное геологическое строение приводит к тому, что гидротермальные поля, связанные с ВОК, могут отличаться друг от друга в пределах одного ВОК, а также от сульфидных полей других ВОК. Для примера рассмотрен гидротермальный узел Семёнов, который состоит из пяти полей [2, 3]. С поверхности ВОК здесь драгированы гидротермально-измененные базальты, перидотиты, габброиды, плагиограниты, диориты и тоналиты [4].

Руды полей Семёнов-1, -3 и -4 имеют марказит-пиритовый состав с высоким содержанием барита (до 20 об. %) и опала [5–7]. Сульфиды Cu, Zn и Pb (халькопирит, изокубанит, сфалерит, галенит) являются аксессуарными или редкими минералами. Руды поля Семёнов-1 содержат высокие концентрации (%) Fe (до 43,54), Ba (до 3,48), Sr (до 623 г/т), SiO₂ (до 47,38) и низкие — Cu (до 0,56), Zn (до 0,11), Pb (до 0,02), Co (до 0,0048), Ni (до 0,0083). На поле Семёнов-5 драгированы массивные марказит-пиритовые и прожилково-вкрапленные халькопирит-пиритовые руды в гидротермально-измененных ультрамафитах [8]. Руды имеют высокие содержания (%) Fe (до 44,50), варьирующиеся — Cu (0,11–16,6), низкие — Zn (до 0,19), повышенные — Co (859–1600 г/т) и Ni (958–1610 г/т) в прожилково-вкрапленных рудах и умеренные и низкие (9,3–509 и 4,0–45 г/т, соответственно) — в массивных. Медно-цинковые руды поля Семёнов-2 с халькопиритом, изокубанитом и сульфидами Zn характеризуются высокими содержаниями Cu (до 19,33%),

Zn (до 18,32%), Au (до 188 г/т), Ag (до 1788 г/т), Cd (до 1347 г/т), SiO₂ (до 29,62%), повышенными — Te (до 34,7 г/т) и низкими — Co (до 0,011%) и Ni (до 0,003 г/т) [9].

Низкие содержания Co и Ni в рудах и минералах полей Семёнов-1, -2, -3 и -4 по сравнению, например, с таковыми в рудах полей Логачёв, Ашадзе, Рейнбоу или Семёнов-5, также связанных с ВОК [1], вероятно, отражают отсутствие генетической связи этих руд с ультрамафитами. Высокие содержания Ba, Sr и SiO₂ в рудах полей Семёнов-1, -2, -3 и -4 типичны для руд гидротермальных полей Лаки Страйк и Менез Гвен, связанных с Азорской горячей точкой и базальтами типа E-MORB [1]. Обогащение Ba (16,20 мас. %) и Pb (20 987 г/т) известно также и для поля Рейнбоу-2 [1], что ставит под вопрос связь его рудообразования с ультрамафитами. Повышенные содержания Te (до 35 г/т) [9] и присутствие теллуридов [10] в рудах поля Семёнов-2 могут указывать на вовлечение в рудообразование кислых пород из глубинной части ВОК. Так, на колчеданных месторождениях Урала высокие содержания Te (30 г/т) и теллуриды типичны для месторождений, формирующихся на кислом основании [11].

Колчеданные месторождения Южного Урала, залегающие в ультрамафитах (Ишкининское, Ивановское и Дергамышское), находятся на южном фланге Главного Уральского разлома (ГУР) [12]. Их геологическое строение определяется различным сочетанием тектонических пластин и блоков. Ишкининское месторождение приурочено к кровле серпентинитовой пластины и перекрывается олистостромовой толщей. Для Ивановского месторождения характерна позиция на границе серпентинитового и базальтового блоков. Дергамышское месторождение находится в верхней части разреза офиолитового комплекса под пластиной, сложенной верхнедевонскими кремнями.

Руды месторождений зоны ГУР имеют сходные и отличительные черты. Массивные и прожилково-вкрапленные руды установлены на всех объектах, тогда как обломочные, отражающие разрушение первичных руд на морском дне, установлены только на Дергамышском и Ишкининском месторождениях [12]. Присутствие труб черных курильщиков и фоссилизированной фауны на Дергамышском месторождении [13] является прямым доказательством его образования на морском дне, а также указывает на его крайне низкую степень преобразования. Ивановское месторождение содержит только массивные и прожилково-вкрапленные руды, что свидетельствует об их образовании под поверхностью морского дна [14]. На Дергамышском месторождении главными минералами являются пирит и халькопирит, тогда как руды Ишкининского и Ивановского месторождений содержат обильный пирротин.

Руды месторождений зоны ГУР имеют повышенные содержания Co и Ni, которые входят в состав пирита, пирротина, халькопирита, арсенопирита, леллингита, магнетита и хромита и образуют собственные минералы: пентландит, виоларит,

линнеит, макинавит, карролит, кобальтин, аллоклазит, глаукоdot, герсдорфит, никелин, саффорит, раммельсбергит и крутовит [12]. Наиболее низкие содержания Co (0,01–0,21%) и Ni (до 0,05%), так же как и редкие минералы Co и Ni, характерны для наименее преобразованного Дергамышского месторождения. Руды Ивановского месторождения содержат 0,02–0,11% Co и 0,11–0,16% Ni, которые концентрируются во второстепенных и редких сульфидах и сульфоарсенидах Co и Ni. Наибольшие содержания Co (до 10%) и Ni (до 0,45%) и As (до 26%) установлены в сульфоарсенид-сульфидном типе руд на Ишкининском месторождении, который содержит обильные сульфиды и сульфоарсениды Co и Ni, образование которых связывается с диагенетическими процессами [15].

Геологическая позиция и минералого-геохимические особенности первичных руд современных гидротермальных сульфидных полей и древних колчеданных месторождений характеризуются рядом сходных и отличительных черт.

Сходства включают: 1) современные и древние сульфидные залежи, связанные со структурами ВОК, могут быть подразделены на два подтипа: подтип 1, связанный с базальтами ВОК (поля Семёнов-1, -2, -3, -4, Рейнбоу-2 (?), Ириновское, Дергамышское месторождение), с обильными пиритом и марказитом, и подтип 2, связанный собственно с ультрамафитами (поля Рейнбоу-1, Логачёв, Ашадзе, Ишкининское и Ивановское месторождения), с обилием пирротина в рудах; 2) присутствие плагиогранитов в геологических структурах современных и древних объектов; 3) полное отсутствие барита в рудах месторождений зоны ГУР [12], а также в массивных рудах полей подтипа 2: Ашадзе-1, Рейнбоу-1, Логачёв [1] и в прожилково-вкрапленных рудах поля Семёнов-5 [8].

К отличиям можно отнести следующее: 1) современные сульфидные поля, связанные с ВОК, образуются в срединно-океаническом хребте, а их базальты имеют характеристики N- и E-MORB [2], тогда как древние колчеданные месторождения образованы в островодужной обстановке, базальты имеют островодужные (в том числе бонинитовые) характеристики [16]; 2) высокие содержания Zn в рудах современных сульфидных полей, особенно в подтипе 2: 7–14% (Ашадзе), 22–25% (Логачёв), 15% (Рейнбоу) [1], и низкие содержания Zn в рудах месторождений зоны ГУР (до 0,69 и 2% только на Дергамышском месторождении) [12]; 3) высокие содержания Ni (0,1–0,4%) в рудах южноуральских месторождений [12] и в целом низкие — в рудах современных сульфидных полей подтипа 2: 0,002–0,09% [1].

Таким образом, гидротермальные сульфидные поля САХ и древние колчеданные месторождения зоны ГУР, связанные с мантийными породами, имеют определенные сходства, но не являются полными аналогами. Присутствие обильного барита и, соответственно, высоких содержаний Ba в рудах некоторых гидротермальных полей однозначно свидетельствует об отсутствии связи рудообразования с ультрамафитами.

Список литературы

1. *Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J. et al.* Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic-hosted mineralization: A new type of oceanic Cu-Zn-Co-Au volcanogenic massive sulfide deposits // *Diversity of hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges*. AGU Geophysical Monograph. 2010. P. 321–368.
2. *Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I. et al.* A new hydrothermal field at 13°30' N on the Mid-Atlantic Ridge // *InterRidge News*. 2007. Vol. 16. P. 9–10.
3. *Beltenev V., Ivanov V., Rozhdestvenskaya I. et al.* New data about hydrothermal fields on the Mid-Atlantic Ridge between 11°–14° N: 32nd cruise of R/V Professor Logatchev // *InterRidge News*. 2009. Vol. 18. P. 14–18.
4. *Перцев А. Н., Бортников Н. С., Власов Е. А. и др.* Современные колчеданные залежи рудного района Семёнов (Срединно-Атлантический хребет, 13°31' с.ш.): характеристика ассоциирующих пород внутреннего океанического комплекса и их гидротермальных изменений // *Геология рудных месторождений*. 2012. Т. 54, № 5. С. 400–415.
5. *Мелекесцева И. Ю., Котляров В. А., Иванов В. Н. и др.* Руды нового гидротермального сульфидного узла Семёнов (13°31' с.ш.), Срединно-Атлантический хребет // *Литосфера*. 2010. № 2. С. 47–61.
6. *Melekestseva I. Yu., Tretyakov G. A., Nimis P. et al.* Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13°30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input // *Marine Geology*. 2014. Vol. 349. P. 37–54.
7. *Melekestseva I., Maslennikov V., Safina N. et al.* Sulfide breccias from the Semenov-3 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge: authigenic mineral formation and trace element pattern // *Minerals*. 2018. Vol. 8, N 8. 321.
8. *Firstova A., Cherkashov G., Stepanova T. et al.* New data for the internal structure of ultramafic-hosted seafloor massive sulfides (SMS) deposits: case study of the Semenov-5 hydrothermal field (13°31' N, MAR) // *Minerals*. 2022. Vol. 12. #1593.
9. *Melekestseva I. Yu., Maslennikov V. V., Tretyakov G. A. et al.* Gold- and silver-rich massive sulfides from the Semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13' N, Mid-Atlantic Ridge: A case of magmatic contribution? // *Economic Geology*. 2017. Vol. 112. P. 741–773.
10. *Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A. et al.* Au and Te minerals in seafloor massive sulphides from Semyenov-2 hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge // *Minerals*. 2019. Vol. 9. #294.
11. *Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. R. et al.* Tellurium-bearing minerals in zoned sulfide chimneys from Cu-Zn massive sulfide deposits of the Urals, Russia // *Mineralogy and Petrology*. 2013. Vol. 107. P. 67–99.
12. *Зайков В. В., Мелекесцева И.Ю., Артемьев Д. А. и др.* Геология и колчеданное оруденение южного фланга Главного Уральского разлома. Миасс: Геотур, 2009. 376 с.
13. *Maslennikov V. V., Maslennikova S. P., Large R. et al.* Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: Mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers // *Ore Geology Reviews*. 2017. Vol. 85. P. 64–106.
14. *Nimis P., Tesalina S. G., Omenetto P. et al.* Phyllosilicate minerals in the hydrothermal mafic–ultramafic-hosted massive-sulfide deposit of Ivanovka (southern Urals): comparison with modern ocean seafloor analogues // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2004. Vol. 147, N 3. P. 363–383.
15. *Мелекесцева И. Ю., Масленников В. В., Третьяков Г. А.* Диагенез обломочных руд Ишкининского кобальт-медноколчеданного месторождения, Южный Урал: минералогическо-геохимические данные и термодинамическое моделирование // *Литосфера*. 2022. № 2. С. 179–199.
16. *Nimis P., Zaykov V. V., Omenetto P. et al.* Peculiarities of some mafic–ultramafic- and ultramafic-hosted massive sulfide deposits from the Main Uralian Fault Zone, southern Urals // *Ore Geology Review*. 2008. Vol. 33, N 1. P. 49–69.

ПРИМЕНИМОСТЬ КОНЦЕПЦИИ УЯЗВИМЫХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ В РАЙОНАХ ОСВОЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Молодцова Т. Н.¹, Ермакова Л. А.², Гебрук А. В.¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: tina@ocean.ru

Концепция уязвимых морских экосистем (УМЭ) разработана и принята в 2008 г. Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) для управления глубоководным рыболовством и охраны морской среды и ресурсов в районах за пределами зон национальной юрисдикции [1–3] в качестве руководящих указаний для управления глубоководным рыбным промыслом. В соответствии с концепцией ФАО [1], УМЭ — это любые глубоководные экосистемы, которые можно рассматривать в четких границах, которые характеризуются уязвимостью по отношению к определенному антропогенному воздействию. В термин «уязвимость» вкладывается ожидание существенных негативных изменений в местообитаниях, популяциях или сообществах гидробионтов при антропогенном воздействии. В качестве критериев уязвимости рассматриваются [1, 3]: 1) уникальность или редкость, невозполнимость утраты (местообитания эндемичных видов, редких видов, видов под угрозой исчезновения, встречающихся только на этих участках; обособленные районы размножения, питания и развития молодежи); 2) функциональное значение местообитаний (для выживания, функционирования, воспроизводства, восстановления популяций); 3) хрупкость (высокая вероятность деградации под воздействием антропогенной деятельности); 4) особенности жизненных циклов видов, входящих в экосистему, осложняющих их восстановление (медленные темпы роста, позднее созревание, непредсказуемость оседания личинок, высокая продолжительность жизни); 5) структурная сложность сообщества (наличие в экосистемах сложных биогенных структур, образованных совместным действием биотических и абиотических факторов экосистемы, высокое биологическое разнообразие). Обычно такие экосистемы имеют большое непосредственно экономическое значение или их важность может быть выражена в терминах экосистемных услуг (в том числе потерянной прибыли) [2]. Для облегчения выделения УМЭ разработана концепция видов индикаторов, присутствие

которых в улове в определенном количестве является причиной выделения УМЭ, при этом в разных регионах группы видов индикаторов могут отличаться [2].

Основная идея, использованная ФАО для ограничения промысла, в дальнейшем была адаптирована для других инструментов регулирования за пределами и в пределах международной юрисдикции [2, 3], в том числе для районов освоения глубоководных минеральных ресурсов.

Цель нашей работы — объяснить, каким образом концепция УМЭ используется МОМД в настоящее время и какие могут быть проблемы при реализации этой концепции для разных районов освоения глубоководных минеральных ресурсов.

Список литературы

1. International guidelines for the management of deep-sea fisheries in the high seas / Food, Organization A.: FAO, 2009.
2. *Baco A. R., Ross R., Althaus F., Amon D., Bridges A. E., Brix S., Buhl-Mortensen P. et al.* Towards a scientific community consensus on designating Vulnerable Marine Ecosystems from imagery // *PeerJ*. 2023. Т. 11. Р. e16024.
3. *Спирidonov В. А., Винников А. В., Голенкевич А. В., Майсс А. А.* «Уязвимые морские экосистемы» и близкие понятия в практике управления морским природопользованием: концепции, терминология и возможности приложения к сохранению морской среды и биологических ресурсов // *Труды ВНИРО*. 2018. Т. 174. С. 143–173.

КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ И АВТОНОМНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТА — СБОРЩИКА ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ

Павлюченко С. А., Горлов А. И., Андрейкин Н. В., Колташев Я. А.

ООО «Инлайн», Санкт-Петербург, Россия
<https://devstars.ru/>

Компания ООО «Инлайн» выполняет исследование и разработку компьютерного зрения и алгоритмов машинного обучения для автономной работы робота-сборщика железомарганцевых конкреций по заказу АО «ГИКО».

Робот представляет собой небольшой объект, исполненный в биостилистике. Робот, подобно морскому скату, будет перемещаться на небольшом расстоянии над поверхностью дна, используя боковые плавники, останавливаться и выполнять сбор.

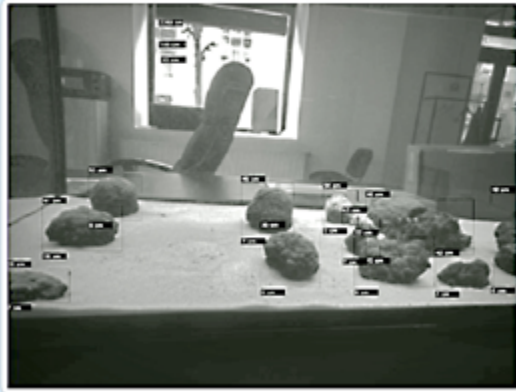
В 2023 г. мы провели исследования по выявлению оптимальных параметров одного из основных элементов робота — камеры для стереозрения. Обязательное требование — это, конечно же, синхронизация между левой и правой камерами и широкий угол обзора, так как в воде из-за преломления света он сужается.

Для детекции ЖМК используется модель yolov8, чтобы, соответственно, понять, до какой конкретной цели определять расстояние. Для определения расстояния используем алгоритм SGM, который работает на аппаратном ускорителе OFA (Optical Flow Accelerator), он встроен на устройствах Jetson Orin NX и Orin Nano, что позволяет значительно снизить нагрузку с основных компонентов платы и не загружать процессор и GPU.

Задача обнаружения и оценки положения конкреций была успешно решена и интегрирована в прототип (рис.). Программа реализована в среде ROS2, которая предназначена для разработки роботов. Наше решение использует ресурсы бортового компьютера на 10–15%, то есть имеется запас для других алгоритмов.

Автономное управление движением (RL). Сейчас наше внимание сосредоточено на алгоритмах управления движением робота, чтобы обеспечить возможность сбора

Realsense



Gxvision



Примеры компьютерного зрения с двух разных стереокамер (с углами обзора 87° (слева) и 130°(справа))

конкреций. Один из принятых подходов — это обучение с подкреплением (RL) — метод машинного обучения, при котором модель обучается, взаимодействуя со средой.

Модель выбирает определенные действия, исходя из текущего состояния среды, и после совершения каждого действия получает от среды обратную связь в виде награды или штрафа. Цель модели — максимизировать полученную награду.

Модели чаще всего называют агентами, которые отличаются способом обучения. Существует два вида RL-агентов — Model-based и Model-free. Model-based — это агент, который симулирует реальную среду взаимодействия. Обучив такую модель, можно сократить взаимодействие со средой, что ускоряет разработку. Model-free — это агент, который учится использовать текущее состояние среды для выбора оптимального действия, что приводит к появлению стратегии, которой агент руководствуется для успешного решения проблемы.

По сравнению с обучением на реальном образце робота в симуляции время «ускоряется» в сотни и тысячи раз, за счет этого обучение происходит гораздо быстрее: больше сценариев и попыток.

Мы применяем такие среды: Gazebo, Mujoco, pyBullet. Существенной проблемой является недоступность сред для подводного моделирования, которые учитывают физические явления при выполнении действий в воде.

Сейчас мы обучаем нашего агента управлять подводным роботом и тестируем агента SAC, который по многочисленным тестам является одним из лучших агентов для решения задачи.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОИСКОВЫХ РАБОТ НА ГЛУБОКОВОДНЫЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СУЛЬФИДЫ В АРКТИКЕ И ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЯХ

Петров В. А.^{1, 2}

¹ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vladimir@spmi-petrov.ru

Основные перспективы обнаружения рудоносных гидротермальных систем вблизи границ Российской Федерации связаны: 1) с Охотским морем, в частности с зоной Большой Курильской островной дуги; 2) с хребтом Гаккеля, протянувшимся между котловинами Нансена и Амундсена.

Согласно информации, представленной в базе данных InterRidge Vents Database Ver. 3.4, на момент 2020 г. в пределах островных дуг и задуговых бассейнов открыто и изучено 153 активных гидротермальных поля (с учетом неактивных и малоизученных это число возрастает до 297 полей) с сульфидным оруденением, связанных с кальдерами подводных вулканов и заостроводужными зонами спрединга [5]. Преобладающая часть рудных полей ГПС находится в юго-западной части Тихого океана (ЮЗТО) в пределах границ исключительных экономических зон различных стран (Япония, Папуа — Новая Гвинея и др.) [5, 9].

В общегеологическом плане не вызывает сомнения, что Курильская островодужная зона представляет большой интерес с позиции выявления подводных сульфидных руд, аналогичных известным в островных дугах ЮЗТО. Кроме того, в районе Курильской дуги были подняты железомарганцевые корки и металлоносные осадки гидротермального происхождения, указывающие на возможность формирования высокотемпературных сульфидных руд [1, 2].

Рудная специализация островодужных и задуговых гидротермальных систем обладает отличиями от объектов, приуроченных к срединно-океаническим хребтам (СОХ) [11]. Имеющиеся сведения позволяют предположить, что минералогия подводных рудных полей Курильской дуги будет обладать большим разнообразием, в соответствии с разнообразием островных руд, включающих сульфидные залежи

колчеданного типа, содержащие Cu, Zn, Pb с попутно присутствующими Mo, Cd, Ga, Ge, Ag, Au, самородной вулканической серой, баритами, Re, In, Ge, Mo, Sn, Bi, As, Au и Ag.

Наличие большого количества объектов-аналогов свидетельствует о высоких перспективах региона в плане развития рудообразующих систем и формирования рудных залежей ГПС. Однако современный уровень изучения и выявления рудных объектов гидротермального генезиса в рассматриваемом регионе крайне низок, поскольку систематические геологоразведочные работы на сульфидные руды в пределах Курильской островной дуги не проводились.

Хребет Гаккеля — самый медленный сегмент мировой системы СОХ со средней скоростью спрединга, изменяющейся от 12,7 мм/год у западной оконечности (вблизи Гренландии) до 6 мм/год у восточной оконечности (в районе его сочленения с шельфом моря Лаптевых) [7]. Рифтовая долина — достаточно заглубленная с перепадами высот более 2 км. Спрединг на протяжении большей части хребта ортогонален, среднее простирание оси составляет 30–50°, среднее направление растяжения — 120–140° [8]. Исключение представляет восточный участок, где спрединг осложняется сдвиговой компонентой [10].

Приблизительная оценка количества гидротермальных полей во всей системе СОХ, исходя из существующей прямой взаимосвязи между частотой встречаемости гидротермальных систем и скорости спрединга, составляет ~1000–1500 полей [3, 4, 6]. Оценка для хребта Гаккеля производилась только для его относительно изученной части между 6° з.д. и 85° в.д. (~985 км) — 0,91–0,93 гидротермальных поля каждые 100 км, что составляет около 9 рудных объектов в пределах выделенного участка [6]. Если экстраполировать существующую оценку частоты встречаемости на практически неизученную восточную часть хребта Гаккеля вплоть до 120° в.д. (~1620 км), то количество потенциальных рудных объектов увеличивается до ~15. Приведенная оценка строится на гипотезе о превалирующем контроле частоты гидротермальных систем магматическим бюджетом [4]. Низкая магматическая активность в пределах медленных и ультрамедленных хребтов объясняет пониженную частоту встречаемости рудных полей. Тем не менее достаточно слабая изученность ультрамедленных хребтов не позволяет однозначно доверять полученным оценкам. Вероятно, как и в случае с быстроспрединговыми хребтами [3], частота их встречаемости недооценена.

Таким образом, Курильская островная дуга, наравне с хребтом Гаккеля, остается одним из последних «белых пятен» для обнаружения сульфидного оруденения в океане. При этом степень перспективности объектов оценивается весьма высоко: согласно предварительным прогнозам, десятки рудных полей ГПС остаются неоткрытыми.

Список литературы

1. Андреев С. И. Минерально-сырьевой потенциал дальневосточных морей и перспективы его освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. №. 4 (38). С. 5–23.
2. Дубинин А. В. и др. Геохимия и проблемы генезиса железомарганцевых образований островных дуг западной части Тихого океана // Геохимия. 2008. №. 12. С. 1280–1303.
3. Baker E. T. et al. How many vent fields? New estimates of vent field populations on ocean ridges from precise mapping of hydrothermal discharge locations // Earth and Planetary Science Letters. 2016. Vol. 449. P. 186–196.
4. Baker E. T., German C. R. On the global distribution of hydrothermal vent fields // Mid-Ocean Ridges: Hydrothermal Interactions Between the Lithosphere and Oceans, Geophys. Monogr. Ser. 2004. Vol. 148. P. 245–266.
5. Beaulieu S. E., Szafranski K. (2020) InterRidge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields, Version 3.4. World Wide Web electronic publication available from <http://vents-data.interridge.org> Accessed 2024-04-24.
6. Beaulieu S. E., Baker E. T., German C. R. Where are the undiscovered hydrothermal vents on oceanic spreading ridges? // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2015. Vol. 121. P. 202–212.
7. Cochran J. R. et al. The Gakkel Ridge: Bathymetry, gravity anomalies, and crustal accretion at extremely slow spreading rates // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003. Vol. 108, N B2. P. 12.
8. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F. Geologically current plate motions // Geophysical journal international. 2010. Vol. 181, N 1. P. 1–80.
9. Diehl A., Bach W. MARHYS (MARine HYdrothermal Solutions) Database: A global compilation of marine hydrothermal vent fluid, end member, and seawater compositions // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2020. Vol. 21, N 12. e2020GC009385.
10. Dubinin E. P., Kokhan A. V., Sushchevskaya N. M. Tectonics and magmatism of ultraslow spreading ridges // Geotectonics. 2013. Vol. 47, N 3. P. 131–155.
11. Piercey S. J. The setting, style, and role of magmatism in the formation of volcanogenic massive sulfide deposits // Mineralium Deposita. 2011. Vol. 46. P. 449–471.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗРАБОТКИ ДОБЫЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ТПИ

Петухов С. И.



ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: Petukhov@vniio.ru

Задача промышленной добычи ТПИ укладывается в общую схему и связана с комплексным осуществлением трех отдельных операций: сбор рудного материала на дне океана, подъем на плавсредство, предварительное обогащение и подготовка ТПИ к транспортировке на сушу.

ЖМК. Большинство подрядчиков МОМД, среди которых NORI (Япония), GSR (Бельгия), BRG (Германия), NIOT (Индия), COMRA (Китай), в своих концепциях проведения добычи ЖМК рассматривают схему с применением гусеничного сборщика и трубного става. На сегодняшний день наиболее глубоко проработанным, коммерческим проектом на ЖМК является схема добычи The metals company (ТМС, Канада) [1], которая основана на системе сбора руды гусеничным сборщиком (рис.). В 2022 г. компания провела успешные испытания в Тихом океане своего добычного комплекса, разработанного совместно с компанией Allseas. В ходе испытаний было собрано и поднято на судно более 3 тыс. тонн конкреций. Отметим, что предлагаемая глубоководная добыча конкреций предусматривает использование многотонных машин-сборщиков, разрушающих экосистему морского дна.



В связи с возникающими проблемами по сохранению окружающей среды при проведении добычных работ на морском дне набирают популярность более экологически привлекательные добычные схемы. Одной из таких является добычная схема с использованием роботов — сборщиков конкреций (ООО «ГИКО» (Россия) и Impossible metals (США)). Компания Impossible Metals (США) [2] (см. рис.) разрабатывает экспериментальную концепцию селективной добычи конкреций. В планы компании входит разработка флота АНПА-роботов, которые будут проплывать над морским дном и с помощью манипуляторов отбирать конкреции, не нанося большого вреда экологии. Предполагается, что флот, состоящий из шести АНПА-сборщиков конкреций будет создан в 2025 г.

Способы добычи ЖМК

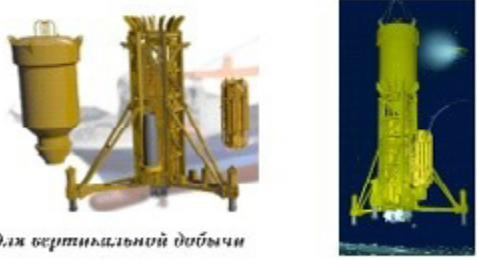
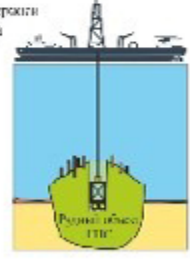
<p>Судно поддержки производства</p>	 <p style="font-size: 24px; font-weight: bold; color: white; background-color: black; padding: 5px; display: inline-block;">Добычной комплекс TMS</p>	<p>Судно поддержки производства</p>	 <p style="font-size: 24px; font-weight: bold; color: white; background-color: black; padding: 5px; display: inline-block;">Добычной комплекс Impossible metals</p>
<p>Система подъема</p>			<p>Роботы для селективной сборки конкреций</p>
<p>Гусеничный сборщик конкреций</p>			

Способы добычи ГПС


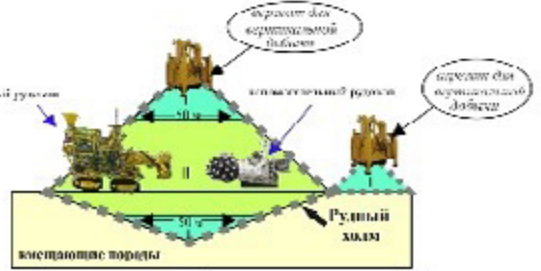
Горизонтальный

<p>DSMF</p>	<p><i>добычные машины</i></p> <p><small>©Nippon Yusen Kaisha</small></p>  <p><i>Вспомогательный рудокон</i> <i>Валовый рудокон</i> <i>Собирающая машина</i></p>	 <ol style="list-style-type: none"> 1. Вспомогательный рудокон — перекачивает через карманную разработку руду с подготовкой и выгрузки в карманную (сезонную) рудовыем. 2. Валовый рудокон — выгружает руду с карманной разработки в основной рудовый выем заранее подготовленный для выгрузки рудовым участком. 3. Собирающая машина — сбор, транспортировка, измерения и передача данных о состоянии и глубины в рудовой выем. 4. Система подъема — обеспечивает доставку руды и воды глубины на добытое место. <p style="text-align: right; font-weight: bold; font-size: 12px;">схема добычи</p>
--------------------	---	---

Вертикальный

<p>BAUER</p>	<p><i>агрегат для вертикальной добычи</i></p> 	<p>Судно поддержки производства</p> <p>глубина вскрытия до 40 м.</p>  <p style="text-align: center; font-size: 10px;">Рудный объект ГПС</p>
---------------------	---	--

Комбинированный

<p>JOGMEC</p>	<p><i>агрегат для вертикальной добычи</i></p> 	 <p style="font-size: 10px;">Квадратная схема разработки рудного месторождения ГПС в приближенном трех-этапов горных машин JOGMEC</p>
----------------------	---	---

I- участок работы вертикальной машины
 II- участок работы самоходных машин

Добычные комплексы на ТПИ Мирового океана

ГПС. Известный коммерческий проект на ГПС Nautilus Minerals Inc. основан на горизонтальной системе выемки руды с использованием трех самоходных агрегатов, выполняющих различные функции.

Схема добычи, разработанная Nautilus Minerals, включает (см. рис.):

- 1) вспомогательный рудокop, осуществляющий предварительную разработку залежи с подготовкой площади для валового (основного) рудокopа;
- 2) валовый рудокop — высокопроизводительная режущая машина, выполняющая основную работу на заранее подготовленном вспомогательным рудокopом участке;
- 3) собирающая машина, предназначенная для сбора раздробленного материала и передачи его в виде пульпы в трубный став [3].

Как известно, компании Nautilus Minerals не удалось реализовать свой проект, но примерно такую схему при проведении добычных испытаний на ГПС в своей исключительной экономической зоне применили специалисты JOGMES (Япония) [4]. В ходе испытаний был использован вспомогательный и валовый рудокopы. В результате руда была поднята на поверхность с глубины 1,6 км. Проведенные испытания показали, что работу и передвижение горных машин значительно ограничили неровности рельефа (углы склонов достигали 25°) и залегающие на полигоне осадки [4]. Кроме ряда имеющихся технических сложностей, неизбежных при реализации горизонтального способа добычи, наносится также и невосполнимый вред окружающей среде морского дна.

При создании добычных комплексов на ГПС следует развивать проекты, наносящие минимально возможный вред окружающей среде. В качестве приоритетных могут стать комплексы, основанные на вертикальной добыче ГПС, отличающиеся закрытыми комплексами размельчения и подъема рудной массы. В этом направлении ведут свои исследования Германия и Япония.

Предлагаемый компанией Bauer AG (Германия) прототип добычного агрегата, практически готовый к испытаниям, представляет собой вертикальную стальную конструкцию с двумя режущими барабанами, оснащенными зубьями (см. рис.). При проведении работ барабаны вращаются в противоположном направлении, полученный при этом рудный материал транспортируется в накопительный бункер, размещенный на агрегате. После заполнения бункер поднимается на судно поддержки производства с помощью тросов [5].

Специалисты компании Jогтмес (Япония) разработали свой вариант добычного агрегата вертикального типа и предлагают либо применять его для отработки небольших рудных холмов (диаметром около 50 м), либо использовать его в качестве дополнительного инструмента для подготовки участка для работы самоходных гусеничных машин [6] (см. рис.).

Выводы. Мировые тенденции разработки добычных технологий направлены на создание комплексов, наносящих минимальный вред окружающей среде. На сегодняшний день предлагаемая многими подрядчиками схема глубоководной добычи ТПИ предусматривает использование многотонных машин на гусеничном ходу, нарушающих экосистему. Несмотря на постоянную работу по уменьшению воздействия на окружающую среду, полностью устранить проблемы не представляется возможным. Разработка более экологически привлекательных добычных технологий освоения минеральных ресурсов дна Мирового океана становится все более актуальной на фоне постоянных призывов заморозить все проекты по добычи ТПИ на дне океана.

Список литературы

1. <https://metals.co/>
2. https://docs.google.com/presentation/d/1FloilKqMmyJBIQonkXLdjV-QCvzBG4p4fmPJqqoJoyc/edit#slide=id.g2830dadd660_0_1911
3. https://www.miningnewsfeed.com/reports/Solwara_1_PEA_02272018.pdf
4. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-87982-2_7
5. https://www.underwaterminerals.org/_files/ugd/cacc41_35e051021084471db274cea05cbe8ff1.pdf
6. <https://www.jogmec.go.jp/content/300386327.pdf>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЙ НА ПРОФИЛЯХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОНОВЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОЙ СРЕДЫ

Седышева Т. Е.¹, Фёдоров Д. С.², Сапириди А. П.²

¹ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

² АО «Южморгеология», Геленджик, Россия

E-mail: t.sedysheva@vnii.ru, fedorovdc@rusgeology.ru, sapiridiap@rusgeology.ru

Аннотация. В докладе приводятся результаты работ измерения течений на профилях для исследований фоновых экологических параметров морской среды на одном из участков в Российском разведочном районе железомарганцевых конкреций (РРР-ЖМК), что является весьма важным для установления первоначального состояния морской среды до начала испытания коллекторных систем и оценки возможного воздействия на морскую среду.

Ключевые слова: полигон РРР-ЖМК, профили зондирования, акустический профилограф, железомарганцевые конкреции, скорости течений.

Заклученный с МОМД контракт на разведку ЖМК предусматривает проведение геологоразведочных работ, составной частью которых является исследование океанографических характеристик разведочного района как фоновых экологических параметров с целью установления первоначального состояния морской среды до начала испытания коллекторных систем и оценки возможного воздействия на морскую среду. Одной из таких характеристик является изучение параметров течений, которое может производиться методами измерения течений на автономных буйковых станциях, на профилях и на станциях вертикального гидрозондирования. Несомненно, совокупность всех методов будет давать наиболее адекватные представления о водном режиме района, однако в данном сообщении речь касается результатов измерений скорости течений на профилях.

Работы проведены в 2021 г. с борта НИС «Геленджик» в РРР-ЖМК, расположенном в Тихом океане в зоне разломов Кларифон и Клиппертон, в рамках Государственного контракта от 20.08.2019 № К.2019.003.

Для измерения течений на разрезах методом буксировки использовались акустический профилограф ADCP WHS-300 с прошивкой отслеживания дна и зонд

SBE-9plus, установленный в горизонтальном положении и имеющий альтиметр для обеспечения безопасного прохождения над дном. По оптико-волоконному кабель-тросу зонд соединялся с бортовым блоком SBE-11.

Бортовой блок позволяет записывать измеряемые параметры: температуру, электропроводность, мутность, флуоресценцию (на хлорофилл а), содержание кислорода. Дополнительно для учета и контроля скорости движения аппарата устанавливался маяк-ответчик Oceanic.

Акустический профилограф предназначен для получения профилей течений при работе до глубины 6000 м в автономном режиме.

Помимо основных датчиков, ADCP типа Workhorse Sentinel имеет дополнительные сенсоры: магнитный компас, датчик наклона, датчики давления и температуры. Наряду с использованием измеренных значений давления и температуры при расчете скоростей течений они могут быть использованы и в виде дополнительной океанографической информации.

Профили зондирования были расположены параллельно северной и южной границам рабочего полигона. Измерения течений проводились в автономном режиме. Программирование измерителя осуществлялось непосредственно перед спуском.

Программируемая периодичность измерений составляла 2 мин. Каждое измерение выполнялось как осреднение ансамбля из 40 посылок через 1 с. Ячейка измеряемого профиля течений — 4 м, количество ячеек — 30. При низком количестве взвеси уверенно получать удавалось профили течений до 45 м от излучателя (11 ячеек).

После подъема аппарата на борт производилось считывание записанных на внутреннюю память данных измерителя течений ADCP. Регистрация измерений зонда CTD SBE-9plus проводилась в режиме реального времени на борту судна при буксировке.

Положение разрезов для измерения придонных течений выбиралось так, чтобы они были направлены поперек структур рельефа дна и, как следствие, поперек течений, характеризовали весь полигон и были технологичны при выполнении буксировки.

Полученные результаты измерений придонных течений методом буксировки ADCP были скорректированы на скорость движения аппарата по донному следу.

Наблюдения на первых профилях выполнялись в широкополосном режиме, на последующих — в узкополосном режиме с ассемблированием нескольких измерений на каждый вертикальный профиль. Полученные данные имеют зашумленный и неоднородный характер, что связано с малым количеством пассивных отражателей и турбулентными возмущениями в придонной зоне.

Для устранения этих недостатков измерений были выполнены фильтрация и осреднение по каждому профилю измерений. После этого было проведено покомпонентное сглаживание скользящим средним вектором течений для получения ряда средних придонных течений.

В 2019 г. было пройдено два профиля (417_CPr01 и 417_CPr02) общей длиной 100 км (рис. 1), в 2021-м — еще два (419CPr03 и 419CPr04) такой же протяженностью (рис. 2).

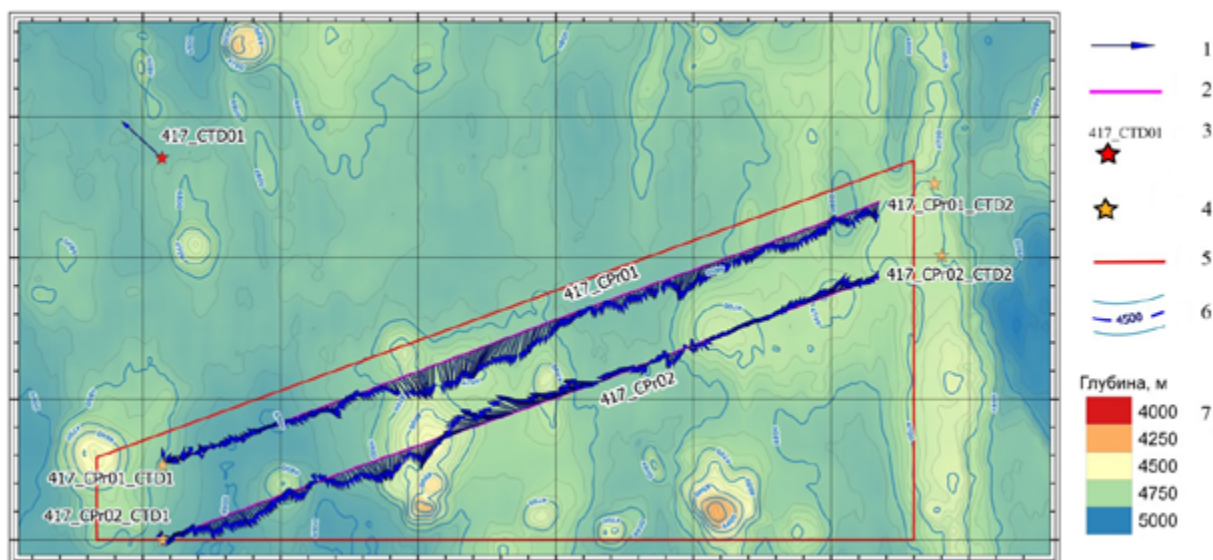


Рис. 1. Осредненные измеренные придонные течения на профилях 417_CPr01 и 417_CPr02: 1 — векторы придонных течений; 2 — линии разрезов измерения течений; 3 — комплексная гидрологическая станция; 4 — дополнительные гидрологические станции; 5 — граница полигона; 6 — изобаты через 25 м; утолщенные через 100 м; 7 — шкала глубин, м

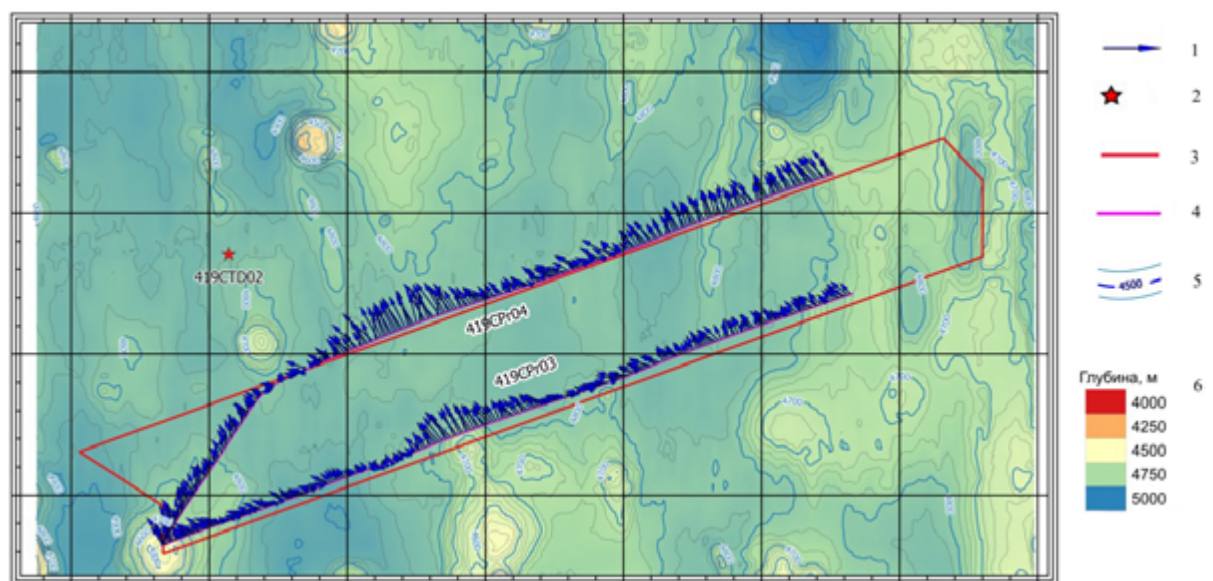


Рис. 2. Осредненные измеренные придонные течения на профилях 419CPr03 и 419CPr04: 1 — векторы придонных течений; 2 — станция вертикального зондирования; 3 — граница полигона; 4 — линии профилей горизонтального зондирования; 5 — изобаты через 25 м, утолщенные через 100 м; 6 — шкала глубин, м

На этих рисунках, совмещающих батиметрию и полученные векторы средних придонных течений, хорошо видна зависимость скоростей течений от рельефа, выражающаяся в их направленности и величине.

В результате было установлено, что средняя скорость течений на профилях 417_CPr01 и 417_CPr02 в слое до 40 м от дна не превышает 8 см/с. При этом на профиле 417_CPr01 преобладает перенос с севера на юг, на профиле 417_CPr02 северный перенос ослабевает, но в центральной части полигона наблюдается усиление переноса с востока на запад.

На профилях 419CPr03 и 419CPr04 средняя скорость течений в пройденном придонном слое до 45 м почти вдвое выше (около 15 см/с). На данном этапе никаких процедур приведения течений к одной фазе прилива не проводилось, но при этом направление волны соответствует представлениям для данного региона и обращено на северо-запад.

Делать глобальные выводы для оценки структуры всего полигона РРР-ЖМК на основе результатов обработки данных четырех профилей течений представляется не очень корректным. Однако некоторые выводы все же можно сделать.

1. Несмотря на равнинный характер рельефа изучаемого участка, видно, что придонные течения стремятся к направлениям вдоль изобат.
2. Более высокие скорости течений наблюдаются около более крутых склонов, на абиссальных равнинах скорости минимальные.
3. Вдоль отдельных поднятий образуются вихревые структуры топографического происхождения, которые могут приводить к значительным переносам взвешенных частиц.
4. Для корректной обработки полученных результатов необходимо дальнейшее проведение полевых исследований с набором статистических данных по изучению структуры течений.
5. В целом полученные данные о скорости и направлении течений согласуются с данными, считающимися характерными для данной части океана.

Список литературы

1. Атлас океанов: Тихий океан / Отв. ред. С. Г. Горшков; гл. ред. В. И. Фалеев, Л. А. Дёмин. Л.: Изд-во ГУНиО МО СССР, 1974. 323 с.
2. Демидова Т. А., Контарь Е. А., Беляев А. М. Скорость течения в придонном слое в районе развития железомарганцевых конкреций в Тихом океане (провинция Клариион-Клиппертон) // *Океанология*. 1990. Т. 30, вып. 6. С. 897–905.
3. Седышева Т. Е., Фёдоров Д. С., Сапириди А. П. Результаты измерения параметров течений на станциях вертикального гидрозондирования для исследований фоновых экологических характеристик океанской среды / *Материалы XXIV Международной научной конференции по морской геологии*. 2022. Т. III. С. 308–311.
4. Morgan C. L., Odunton N. A., Jones A. T. Synthesis of Environmental Impacts of Deep Seabed Mining // *Marine Georesources & Geotechnology*. 1999. Vol. 17. P. 307–356.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ АНОМАЛЬНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ПЮИ-ДЕ-ФОЛЬ В ОСЕВОЙ ЗОНЕ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

Силантьев С. А.¹, Буйкин А. И.¹, Гуренко А. А.², Чугаев А. В.³, Шабыкова В. В.¹,
Цховребова А. Р.¹, Бельтенов В. Е.⁴, Бич А. С.⁴

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва, Россия

² Centre de Recherches Petrographiques et Geochimiques, Вандёвр-ле-Нанси, Франция

³ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Москва, Россия

⁴ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

Полученные в проведенном исследовании данные о составе закалочных стекол вулкана Пюи-де-Фоль позволяют прийти к ряду выводов, дополняющих существующие представления о магматических и тектонических процессах, формирующих геоморфологические черты рифтовой долины низкоскоростных центров спрединга, к которым относится Срединно-Атлантический хребет (САХ):

- 1) закалочные стекла вулкана Пюи-де-Фоль являются продуктом сильно деплетированного расплава, образованного при частичном плавлении мантийного резервуара DM;
- 2) вулкан Пюи-де-Фоль образован в результате деятельности долгоживущей магматической камеры, расположенной под осью рифтовой долины САХ внутри океанической коры;
- 3) в формировании родительских для вулкана Пюи-де-Фоль расплавов, помимо резервуара DM, возможно, участвовал мантийный источник, обогащенный несовместимыми элементами;
- 4) в закалочных стеклах, отобранных на вершине вулкана Пюи-де-Фоль, установлены слабые геохимические сигналы контаминации родительских расплавов гидротермальным компонентом;
- 5) в районе осевой зоны САХ на 20°31' с. ш. установлены признаки стагнации спрединга океанической коры.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ ГЛУБОКОВОДНЫХ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СУЛЬФИДНЫХ РУД И ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ МАНТИИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПОЛЯМ В СЕВЕРНОМ ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОМ СЕКМЕНТЕ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

Соколов С. Ю.¹, Бич А. С.²

¹ Геологический институт РАН, Москва, Россия

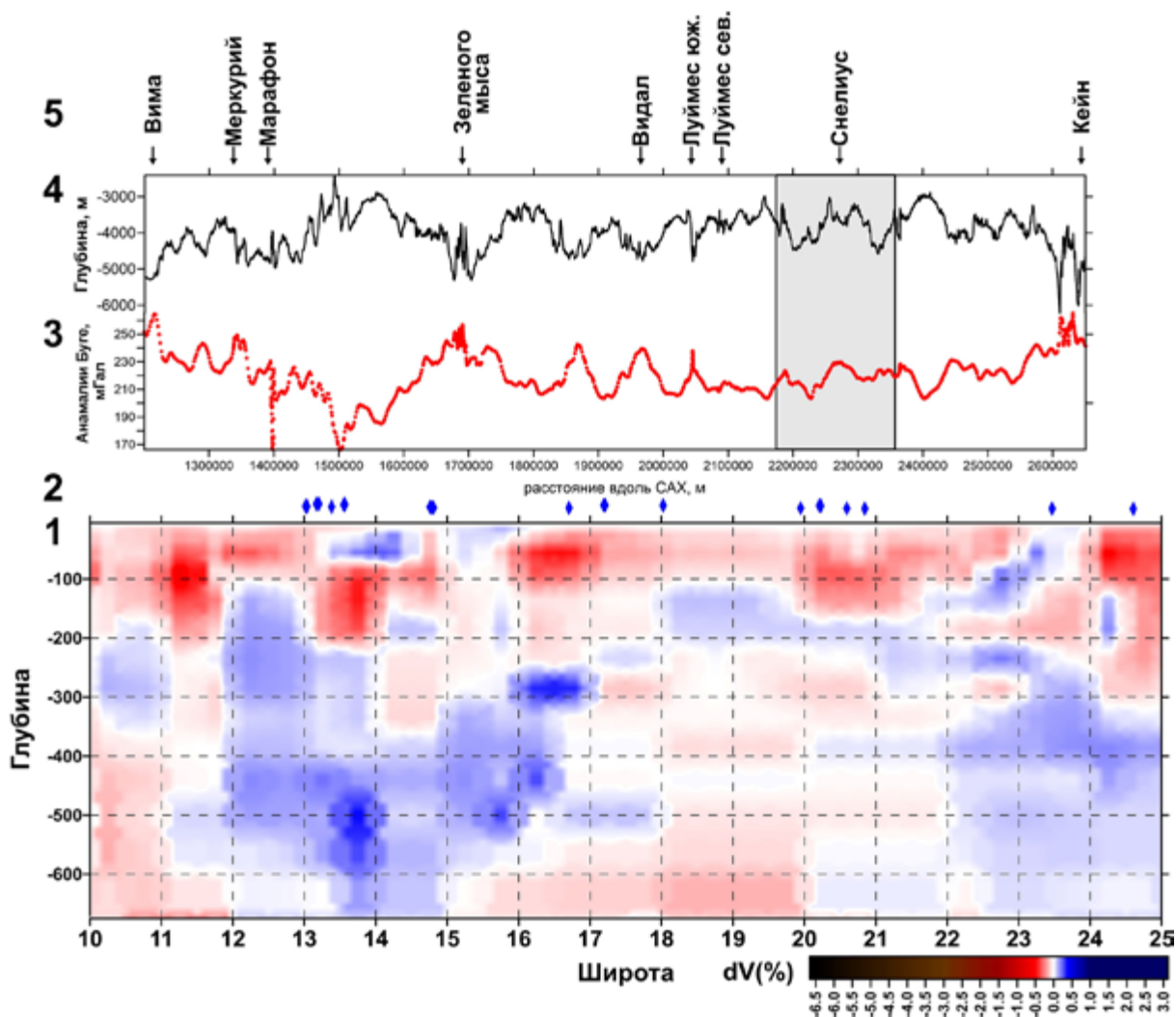
² ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: sysokolov@yandex.ru

Положения рудных объектов глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) вдоль САХ группируются над сейсмотомаграфическими аномалиями типа «микрорплюм» без глубоких корней. На разрезе сейсмотомаграфической модели UU-P07 (рис.) наблюдается распад единой осевой отрицательной аномалии δV_p на цепочку отдельных субвертикальных микрорплюмов в верхних ~200 км между трансформными разломами Вима и Кейн. Глубже наблюдаются холодные блоки, что типично для сегментов САХ с корой Хессовского типа. В условиях медленного спрединга при низком бюджете магмы с неглубокими магматическими очагами это может означать, что ГПС ассоциируются с определенного типа базальтами. Возможно также формирование отрицательных δV_p при серпентинизации и разуплотнении в верхней мантии. Разуплотненные блоки с меньшими скоростями сейсмических волн будут оказывать влияние на средние значения ячеек параметризации модели с размерами ~100 км. В реальности может быть реализовано оба варианта.

Геофизические характеристики аномалий Фая и Буге (см. рис.) в масштабе протяженных сегментов разреза имеют противоразное поведение и непротиворечивую, физически обоснованную интерпретацию за счет реологического состояния мантии, выявляемого по сейсмотомаграфии. Сегмент от разлома Вима до разлома Кейн расположен в области максимальных значений аномалии Буге на всем протяжении САХ, что указывает на наиболее плотные области мантии под хребтом и минимальный магматический дебет. Эта область простирается от ~7° ю.ш. до ~25° с.ш., а наибольшее количество рудных объектов выявлено в северной ее части.

Пространственно-временная структура сейсмичности вдоль САХ [1] по телесеismicким данным с магнитудой не менее 4 имеет ярко выраженные



Корреляция детальных геолого-геофизических параметров вдоль района исследований ГПС между разломами Вима и Кейн. Серым прямоугольником показан район исследований ГПС с ярко выраженными нетрансформными смещениями. Обозначения: 1 — вариации скоростей δV_r по данным модели UU-P07 [4, 6, 8]; 2 — проявления гидротермальных построек ГПС по данным [5] и данным ФГБУ «ВНИИ-Океангеология» в районе исследований; 3 — значения аномалий Буге (мГал) на сетке 1', горизонтальные координаты — UTM23; 4 — значения гравитационных аномалий в свободном воздухе (Фая) (мГал) [7] на сетке 1', горизонтальные координаты — UTM23; 5 — положение пересечение с САХ и названия основных трансформных разломов

особенности — полосы и пустоты. Интерпретация полос сейсмичности в сочетании с минимумами δV_r состоит в ее объяснении наличием дискретных по латерали зон прогретой и частично расплавленной мантии, в которых подъем вещества формирует аномальное поле δV_r и устойчивый тремор. Основные проявления полос соответствуют сегментам САХ, где превалирует низкотемпературный и малоглубинный магматизм «спредингового» типа. Интерпретация пустот сейсмичности состоит в проявлении высокопродуктивного магматизма «плюмового» типа, при котором мантия обладает пониженной вязкостью и не происходит накопления больших напряжений, а частые и слабые сейсмические события не превышают порога детекции. Для сегмента САХ между разломами Вима и Кейн характерно наиболее четко выраженное чередование пустот и полос сейсмичности

с шагом $\sim 1,5^\circ$, которое сопоставимо с обрамлением приповерхностных минимумов δV_p и областями группирования рудных объектов ГПС.

Сопоставление теплового потока с возрастом старта спрединговых процессов и значениями сейсмотомографии δV_p по сегментам САХ [2] подтверждают правильность термальной интерпретации данных сейсмотомографии. Северный приэкваториальный сегмент САХ между разломами Вима и Кейн после исключения «ураганных» гидротермальных значений теплового потока из анализа представлен невысоким средним кондуктивным значением по сравнению с сегментами с выходами плюмов.

Инверсия преобладания скоростей спрединга с восточного фланга САХ на западный в пределах 20° и 24° с.ш. попадает непосредственно к югу от разлома Кейн [3]. В пределах 50 км от геометрической оси САХ в данном сегменте по данным современной сейсмичности сформировано продолжение активной оси к западу от геометрического положения по данным рельефа. Данный сегмент САХ также ярко проявлен нетрансформными смещениями, ориентированными на юг. Это указывает на наличие локальной неустойчивости в мантии, которая отражается в вариациях динамики сегментированных трансформными разломами блоков маломощной литосферы.

При использовании сейсмотомографической модели с пространственным разрешением 50–100 км в ячейку параметризации попадают и усредняются все плотностные неоднородности в пределах этого размера. Другими словами, отрицательные области δV_p могут содержать в неразделенном виде как локальные микроплюмы с прогретой и частично расплавленной мантией, так и зоны развития разуплотненной мантии, связанной с серпентинизацией. Разделить влияние этих эффектов по данным сейсмотомографии не представляется возможным.

Главной особенностью сравнения аномалий Буге и рельефа является отрицательная корреляция на всем протяжении северного приэкваториального сегмента САХ (см. рис.), за исключением района ГПС, где проявлены V-образные нетрансформные смещения. Области с локальными минимумами аномалий Буге, интерпретируемые как эффект наличия прогретой или частично расплавленной мантии, представлены более продуктивным магматизмом, что формирует на поверхности гипсометрически более приподнятый рельеф.

В районе ГПС корреляция рельефа и аномалий Буге положительная. Траектория оси САХ в данном районе была проведена вдоль области современной сейсмичности. Отклонение сейсмичности на запад от геометрического центра спрединга наблюдается в пределах района с V-образными нетрансформными смещениями.

Первый вариант интерпретации положительной корреляции заключается в наличии вдоль района ГПС ультраосновных пород и возможными вертикальными движениями

положительного знака, которые возникают как асимметричная изостатическая компенсация одного из бортов рифта при растяжении на новом месте.

Другой вариант интерпретации прямой корреляции обоснован происходящим в настоящее время перескоком оси САХ в данном сегменте и инициацией магматизма, еще недостаточного, чтобы сформировать отрицательную вариацию аномалии Буге. Прямая корреляция максимумов этих параметров может быть объяснена интенсивными выплавками с подъемом рельефа или выплавками на более приподнятом по сравнению с долиной фланге САХ, но по-прежнему не имеющими обширных мантийных очагов прогретого материала. Данный вариант интерпретации наиболее вероятен и связан с переключением функционирования активной рифтовой системы на запад, но не с появлением в оси САХ ультраосновных пород.

Список литературы

1. Соколов С. Ю., Зарайская Ю. А. Пространственно-временное сопоставление сейсмичности и изостатических аномалий вдоль Срединно-Атлантического хребта // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 4 (44). С. 51–62.
2. Соколов С. Ю., Чамов Н. П., Хуторской М. Д., Силантьев С. А. Индикаторы интенсивности геодинамических процессов вдоль Атлантико-Арктической рифтовой системы // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 2. С. 302–319.
3. Соколов С. Ю., Добролюбова К. О., Турко Н. Н. Связь поверхностных геолого-геофизических характеристик с глубинным строением Срединно-Атлантического хребта по данным сейсмотомографии // Геотектоника. 2022. № 2. С. 3–20.
4. *Amaru M.* Global travel time tomography with 3-D reference models // *Geologica Ultraiectina*. Vol. 274. Mededelingen van de Faculteit Geowetenschappen Universiteit Utrecht. 2007. Dissertation thesis. 174 p. ISBN: 978-90-5744-139-4.
5. *Beaulieu S. E., Szafranski K.* InterRidge Global Database of Active Submarine Hydrothermal Vent Fields, Version 3.4. 2020. World Wide Web electronic publication available from <http://vents-data.interridge.org>. Accessed 2023-01-17.
6. *Hall R., Spakman W.* Mantle structure and tectonic history of SE Asia // *Tectonophysics*. 2015. Vol. 658. P. 14–45.
7. *Sandwell D. T., Smith W. H. F.* Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2009. Vol. 114, N B1. P. 1–18. DOI: 10.1029/2008JB006008.
8. *Van der Meer D. G., Van Hinsbergen D. J., Spakman W.* Atlas of the underworld: Slab remnants in the mantle, their sinking history, and a new outlook on lower mantle viscosity // *Tectonophysics*. 2018. Vol. 723. P. 309–448.

СПОСОБЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РУДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ОКЕАНА

Цымбулов Л. Б.

ООО «Институт Гипроникель», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: TsymbulovLB@nornik.ru

Аннотация. В работе представлен аналитический обзор технологий переработки глубоководных месторождений минерального сырья, среди которых выделяются три основных типа: железомарганцевые конкреции (ЖМК), кобальт-марганцевые рудные корки (КМК), глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС). Рассмотрены различные подходы к переработке донных отложений, включающие как гидрометаллургические способы, основанные на выщелачивании различными минеральными кислотами, так и комбинированные пиро- и гидрометаллургические технологии. Отмечена достаточно высокая степень проработанности ряда технологических направлений, намечены дальнейшие шаги.

Ключевые слова: железомарганцевые конкреции, кобальт-марганцевые корки, полиметаллические сульфиды, никель, медь, кобальт, марганец, технологии, выщелачивание, обжиг, плавка, сегрегация, экстракция.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ШАГАЮЩИХ РОБОТОВ «ТЯЖЕЛОЙ» ВЕСОВОЙ КАТЕГОРИИ

Чернышёв В. В.¹, Арыканцев В. В.², Вершинина И. П.¹, Шаронов Н. Г.¹

¹ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

² ФГУП «ВНИИ автоматике им. Н. Л. Духова», Москва, Россия

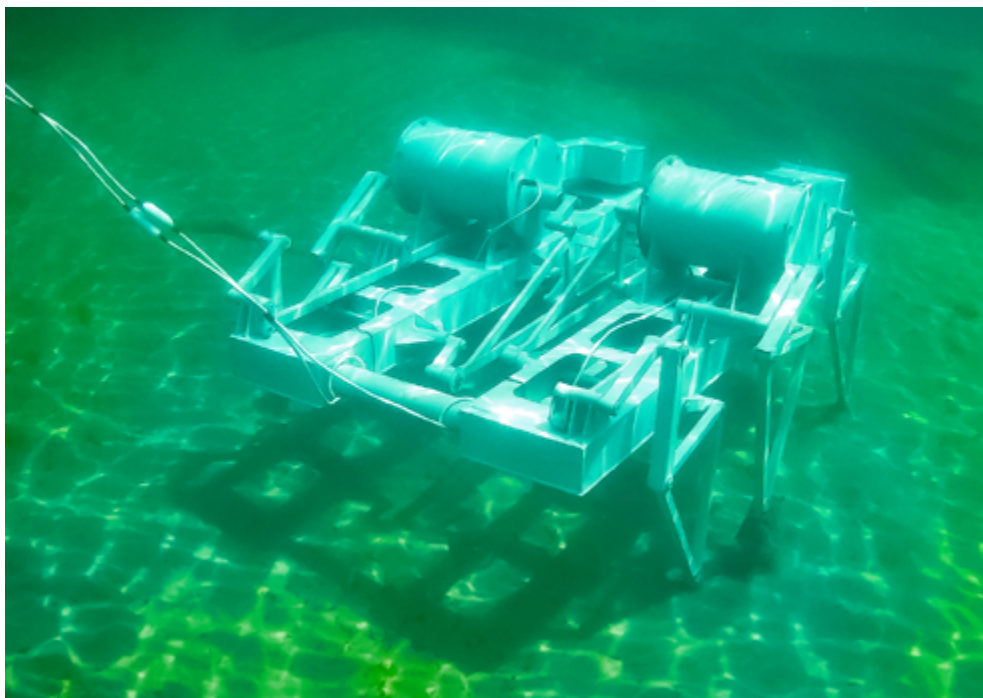
E-mail: vad.chernyshev@mail.ru

В условиях растущего дефицита минерального сырья возрастает интерес к разработке подводных месторождений полезных ископаемых [1]. В настоящее время к наиболее передовым промышленным технологиям освоения ресурсов морского дна с точки зрения финансовых и трудовых затрат можно отнести технологии, основанные на роботизированных добычных модулях, перемещающихся по дну. В ряде стран практическая реализация таких проектов уже осуществляется на базе донных гусеничных машин [2, 3]. Однако опыт подводно-технических работ показывает, что гусеничные машины могут работать под водой только на относительно ровных и достаточно плотных грунтах с небольшими уклонами дна. Более того, даже здесь они могут передвигаться только на пределе сцепления [4]. Чтобы повысить полезное тяговое усилие, реализуемое машинами, передвигающимися по дну, необходимо увеличивать их сцепной вес. По этой причине большинство известных донных гусеничных машин относятся к «тяжелой» весовой категории — их масса составляет десятки и даже сотни тонн. Шагающие машины, по сравнению с гусеничными и колесными, обладают более высокой грунтовой и профильной проходимостью [5]. Они также могут обеспечивать более высокие тяговые свойства [6]. Наряду с этим шагающими машинами значительно сложнее управлять — требуется согласованное управление ногами в каждом цикле движения. Кроме того, шагающий способ передвижения требует дополнительных затрат мощности на преодоление цикловых сил инерции при разгоне и торможении ног, а также на обусловленные шагающим способом передвижения курсовые и вертикальные колебания корпуса.

В работе обсуждаются особенности динамики управляемого движения глубоководных шагающих роботизированных систем «тяжелой» весовой категории. Динамика исследовалась путем математического моделирования. При

моделировании использовались теоретические и экспериментальные результаты, полученные в ходе разработки и испытаний малого шагающего аппарата МАК-1 (масса около 200 кг). Подводный шагающий аппарат (модульно-аппаратный комплекс) МАК-1 (рис.) был разработан для оптимизации параметров механизмов шагания и отработки методов управления движением шагающих робототехнических систем, передвигающихся по дну [7, 8]. Исследование проводилось в рамках проекта Российского научного фонда № 23-29-00720. Проект направлен на создание глубоководных необитаемых донных шагающих роботизированных систем (самоходных технологических и добычных модулей), способных автономно выполнять простейшие грунтовые технологические операции. Научная новизна проекта заключается в адаптации известных методов проектирования шагающих роботов и их информационно-измерительных и управляющих систем к конкретным условиям морского дна и особенностям технологий подводной добычи полезных ископаемых. Наличие экспериментального образца подводного шагающего робота с известными кинематическими и инерционными характеристиками ног значительно облегчило математическое моделирование.

Конструктивно шестиногий шагающий робот МАК-1 включает шагающие модули (опоры) правого и левого борта, соединенные рамой. На раме может быть размещено различное технологическое оборудование. Шагающие модули оснащены бортовым электроприводом, выполненным в виде силовых блоков, размещенных в водонепроницаемых корпусах. Электропривод — асинхронного типа с частотным регулированием скорости вращения. Электропитание и управление осуществляются по кабелю с берега или с судна сопровождения. Общая мощность бортовых



Подводный шагающий аппарат МАК-1

приводов составляет около 2 кВт. Вес всего устройства — около 200 кг при габаритах 1,8×1,8×0,9 м. Максимальная скорость под водой — 3–5 км/ч, в зависимости от условий передвижения. Робот обладает определенными возможностями для самоадаптации к неорганизованной донной поверхности [9].

Профильная проходимость шагающих машин в основном зависит от длины и высоты шага. Грунтовая проходимость также существенно зависит от величины клиренса, — потеря грунтовой проходимости обычно связана с посадкой машины днищем на грунт. В шагающем устройстве МАК-1 максимальная длина и высота шага ног составляют 1,2 и 0,4 м соответственно, а изменяемый клиренс можно варьировать в диапазоне 0,6–0,8 м. Проведено моделирование динамики шагающей машины с увеличенными в 5 раз по сравнению с МАК-1 габаритами и массой, увеличенной до 50 т. В этом случае длина и высота шага будут равны 6 и 2 м соответственно, а клиренс будет варьироваться в диапазоне 3–4 м. Очевидно, что робот с такими параметрами шага будет отличаться исключительно высокой профильной проходимостью.

Определена структура энергозатрат шагающей машины с увеличенными габаритами при курсовом движении и при маневрировании. В ходе моделирования динамики учитывалось увеличение масс и моментов инерции звеньев шагающего движителя при увеличении его габаритов. Выбор поперечных сечений звеньев механизмов шагания осуществлялся из условия обеспечения необходимой прочности. Для определения мощностей был проведен полный кинематический анализ движения механизмов шагания движителя. При определении скоростей и ускорений узловых точек механизмов шагания они рассматривались как плоские многозвенные механизмы. При составлении дифференциальных уравнений движения звеньев их угловые скорости выражались через скорости точек, на которые накладываются внешние связи. Выражения для скоростей узловых точек получались последовательным рассмотрением движений звеньев механизма. Угловые ускорения звеньев движителя определялись дифференцированием их угловых скоростей. Для задания движения корпуса шагающей машины к уравнениям движения также добавлялись формулы для проекций относительных скоростей опорных точек, являющихся узловыми точками опорного звена, а также формулы для относительных координат опорных точек, необходимых для определения момента смены стоп.

Результаты динамического анализа показали, что увеличение габаритов машины не приводит к росту динамических нагрузок в движителе, несмотря на значительное увеличение инерционных характеристик его звеньев. Более того, при увеличении длины ног инерционная нагруженность движителя уменьшается. Степень снижения, естественно, зависит от конструкции механизмов шагания. У исследованного шагающего движителя циклового типа увеличение длины ног в 2 раза, при прочих равных условиях, приводит к снижению сил инерции в движителе приблизительно

в 1,5 раза. Это связано в основном с уменьшением угловых скоростей в приводе по мере увеличения длины шага.

Таким образом, крупногабаритные шагающие машины в подводных условиях будут иметь преимущества перед аналогами меньшего размера. Они будут отличаться существенно лучшей профильной проходимостью и меньшей динамической нагруженностью движителя. Уменьшение динамических нагрузок, в свою очередь, приведет к снижению дополнительных затрат мощности на преодоление цикловых сил инерции при разгоне и торможении ног, а также облегчит управление.

Результаты работы могут быть востребованы при создании «тяжелых» подводных роботов, передвигающихся по дну, предназначенных для различных видов подводно-технических работ и для новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00720, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00720/>.

Список литературы

1. Андреев С. И. Минеральные ресурсы глубоководных районов Мирового океана: состояние проблемы изучения и освоения / С. И. Андреев, Г. А. Черкашёв // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018. № 1. С. 10–15.
2. Щербатюк А. Ф. Об использовании необитаемых подводных аппаратов при освоении месторождений глубоководных минералов // Подводные исследования и робототехника. 2023. № 2 (44). С. 4–19.
3. Lipman A., Yu A. Subsea Mining // Marine Technology Reporter. 2019, November/December. P. 20–25.
4. Hong S., Kim H. W., Choi J. S. Transient Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Extremely Soft Cohesive soil // The 5th ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. 2002. P. 100–107.
5. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines / E. S. Briskin, V. V. Chernyshev, A. V. Maloletov [et al.] // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001, Proceedings of the 4th International Conference. Karlsruhe, Germany, 2001. P. 1005–1012.
6. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability / V. V. Chernyshev, A. E. Gavrilov // Minerals of the Ocean — 7 & Deep-Sea Minerals and Mining — 4: abstracts of International Conference. SPb.: VNII Okeangeologia, 2014. P. 21–24.
7. Design and underwater tests of subsea walking hexapod MAK-1 / V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev, A. E. Gavrilov [et al.] // Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE, 2016. Busan, 2016. 9 p.
8. Research of the walking type of movement in underwater conditions / Chernyshev V. V., Pyanichnikov V. E., Arykantsev V. V., Vershinina I. P., Kalinin Ya. V. // Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2019 — Marseille, 17–20 June 2019, Marseille, France, IEEE. 6 p.
9. Self-control of the underwater walking device with cyclic movers / V. V. Arykantsev, V. V. Chernyshev, Y. V. Kalinin [et al.] // Oceans Conference Record (IEEE), San Diego, CA, 20–23 september. San Diego, CA, 2021.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНТЕРЕСАХ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ МОРЕЙ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РФ И ТИХОГО ОКЕАНА

Шакиров Р. Б., Съедин В. Т., Яцук А. В., Саттарова В. В., Астахова Н. В.,
Колесник О. Н., Валитов М. Г., Ли Н. С., Плетнёв С. П., Пономарёва А. Л.,
Мальцева Е. В.

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва, Владивосток, Россия
E-mail: ren@poi.dvo.ru

В докладе представлен краткий обзор результатов комплексных геолого-геофизических и океанографических исследований Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН) за период 2017–2023 гг., по которым выполнены межрегиональные обобщения по некоторым перспективным направлениям изучения подводных минеральных ресурсов и окружающей среды. Приведены данные по геологическим подводным объектам, в частности марганцевым рудам Японского и Охотского морей и прилегающих акваторий; редкоземельным рудам Томторского рудного узла; древним и современным прибрежно-морским россыпям побережья моря Лаптевых; баритовым рудопроявлениям «Баритовые холмы» в Охотском море; железомарганцевым образованиям восточно-арктического шельфа России; прибрежно-морским россыпям шельфа и побережья дальневосточных морей, в том числе золотоносным россыпям шельфовой зоны юга Приморья и севера Сахалина, титаномагнетитовым россыпям Курильских островов, золотоносным россыпям Северо-Сахалинской равнины и др. Получены прямые признаки углеводородов на участках, ранее считавшихся неперспективными (в том числе в Южно-Китайском море), закартированы и изучены скопления газогидратов в Охотском и Японском морях, подготовлены поисковые работы на газогидраты в Беринговом море, проведены сравнительные исследования гидратоносности окраинных морей северо-западной части Тихого океана и Индийского океана. Исследованы основные особенности распределения литолого-газогеохимических показателей углеводородных газов в донных отложениях наименее изученного в нефтегазоносном отношении юго-западного сектора Восточно-Сибирского моря. На основе данных газогеохимических исследований выполнена оценка перспектив нефтегазоносности восточного шельфа

Арктики. Описаны результаты геомикробиологических исследований в морях Дальневосточного региона. Отдельным огромным минеральным ресурсом в ряде случаев представляются глубоководные отложения сами по себе (пелоидоподобные осадки и др.). В настоящее время зона перехода «континент — океан» и нейтральные воды могут стать важнейшим источником восполнения минерально-сырьевой базы этих полезных компонентов.

Представленные исследования соответствуют основным задачам проекта ГЕОМИР национального плана действий в рамках Десятилетия ООН, посвященного наукам об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030), и выполнены главным образом по направлениям государственного задания. Исследования газогидратов проведены в рамках рабочей группы ВЕСТПАК «Газогидраты и потоки метана в Индо-Тихоокеанском регионе» (CoSGas, 2021–2024), созданной по инициативе и под руководством России.

ПАРАМЕТРЫ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДОБЫЧИ РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ПО ДНУ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Юнгмейстер Д. А., Сержан С. Л., Смоленский М. П., Ефимов Ф. А.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: iungmeister@yandex.ru

В Мировом океане существует несколько типов глубоководных полезных ископаемых, ключевыми из них являются кобальтоносные марганцевые корки (КМК) и железомарганцевые конкреции (ЖМК). Для выполнения спуско-подъемных операций ЖМК и КМК с глубины 3–5 км были предложены технологии, включающие гидротранспорт [1], тросовый подъем при помощи лебедки [2] и даже такие необычные способы подъема, как технология всплывающих кассетных тралов [3] — технология, использующая сжатый воздух. Все эти технологии объединяет один важный фактор — необходимость перехода к созданию опытного образца для экспериментального подтверждения работоспособности предлагаемого технического решения.

Кафедра машиностроения Санкт-Петербургского горного университета совместно с ООО «ГИКО» занимается разработкой комплексов добычи морских твердых полезных ископаемых (ТПИ). Известна технология добычи с помощью комплекса, оснащенного станцией с автономными роботами-сборщиками для добычи ЖМК и шагающими роботами-отбойщиками для отделения КМК. Таким образом, технология применительна для двух видов ТПИ [4]. Большое внимание в патенте уделяется вспомогательному спускоподъемному оборудованию: лебедка с кабель-тросом и рама для захвата и перемещения контейнеров, автономных станций и т. д., оснащенная подруливающими винтовыми двигателями.

В работе [2] даны результаты предварительных экспериментальных исследований модели лапы (рис. 1б, поз. 2) ПА шагающего типа (рис. 1б, поз. 1) для определения зависимости величины гидродинамического сопротивления при подъеме $R_{\text{сопр}}$ от параметров лапы и скорости ее перемещения в воде. На лабораторном стенде моделировался подъем образца в воде при условии, что площадь части лапы диаметром S (рис. 1б, поз. 3) при подъеме изменяется для перемещения

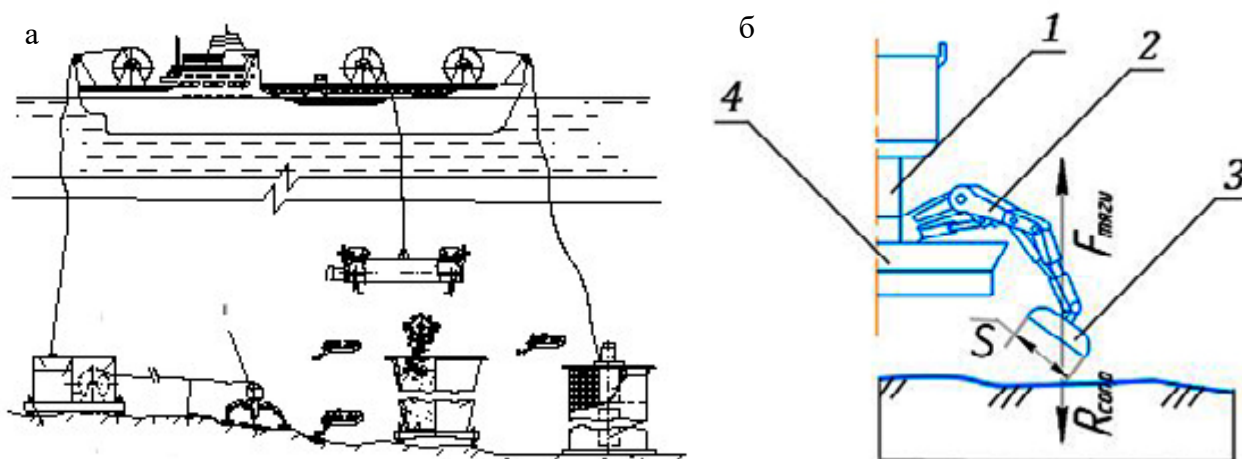


Рис. 1. Принципиальная схема оборудования комплекса для ведения добычных работ морских ТПИ: а — комплекс для добычи глубоководных полезных ископаемых; б — схема подводного аппарата (ПА) шагающего типа (поз. 1)

захваченной породы в коллектор ПА (рис. 1б, поз. 4). Гидродинамическая сила $R_{сопр}$ зависит от площади миделева сечения $\frac{\pi S^2}{4}$, результаты обработки экспериментальных данных при построении зависимости $F_{тяги}$ от скорости подъема v имели характер, отличный от параболической зависимости $R_{сопр}$ от v (рис. 2).

Планируется испытание опытного образца комплекса для добычи морских ТПИ на исследовательском судне «Профессор Логачёв». Для проведения испытаний важен набор вспомогательного оборудования: гидравлические порталы, кран-балки, лебедки.

Предварительные расчеты показали, что для комплекса нужен резервуар для сбора ЖМК/КМК с габаритами 3×5×3 м и рама для захвата с габаритами 3×5×1 м. Предполагается также, что автономная станция с роботами-сборщиками для опытного образца будет уменьшена до 30 особей. В качестве троса будет выступать кабель-трос с арамидной оплеткой, грузоподъемностью 16 т (160 кН).

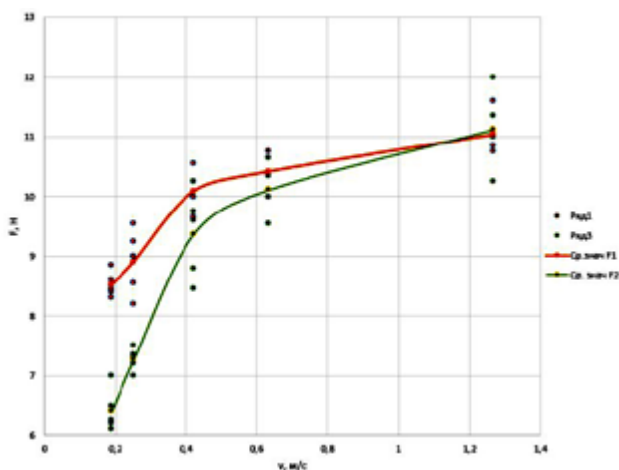


Рис. 2. Зависимости на основе обработки экспериментальных данных $F_{тяги}$ от v

В соответствии с имеющимися данными можно предварительно оценить производительность опытного образца. Грузовая способность кабеля накладывает ограничение по поднимаемому количеству ЖМК/КМК ГТПИ, при этом необходимо учесть вес контейнера $G_{конт}$, вес троса $G_{трос}$, вес рамы для захвата $G_{рам}$ и динамическую характеристику (табл.). В рамках предварительных расчетов динамической характеристикой можно пренебречь.

Предварительный вес поднимаемых ТПИ

$G_{\text{конт}}, \text{ кН}$	$G_{\text{трос}}, \text{ кН}$	$G_{\text{рам}}, \text{ кН}$	$G_{\text{ТПИ}}, \text{ кН}$
10	5	10	135

Чтобы найти производительность по массе ТПИ, воспользуемся формулой 1 и сведем полученную производительность в график (рис. 3).

$$Q_{\text{оп.обр}} = \frac{G_{\text{ТПИ}}}{gT_{\text{ц}}} \quad (1)$$

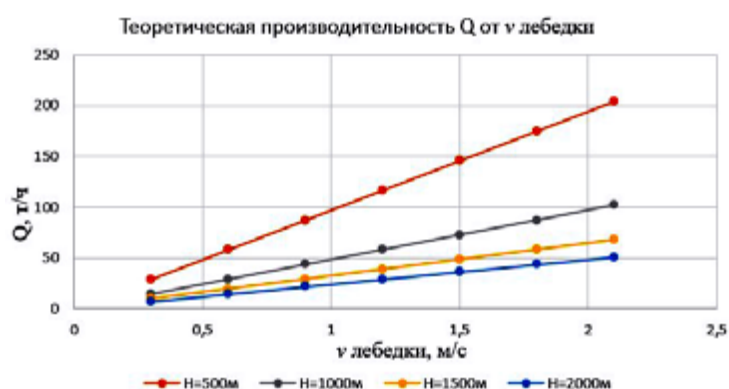


Рис. 3. Теоретическая производительность по массе поднятых ТПИ в зависимости от скорости подъема и глубины залегания ТПИ

Как видно из графика, предпочтительнее всего проводить испытания на малой глубине. Рассчитанную производительность необходимо будет уточнить в дальнейшем при работе непосредственно над созданием опытного образца, дополнив точными параметрами: время сбора ТПИ автономными роботами, динамическая составляющая кабель-троса из арамида, точный вес конструкций резервуара для сбора, рамы с подруливающими винтами для захвата оборудования.

Список литературы

1. Serzhan S. L., Skrebnev V. I., Malevanniy D. V. Study of the effects of steel and polymer pipe roughness on the pressure loss in tailings slurry hydrotransport // *Obogashchenie Rud.* 2023. Vol. 4. P. 41–49. DOI: 10.17580/or.2023.04.0811:43.
2. Юнгмейстер Д. А., Смоленский М. П., Исаев А. И., Ефимов Ф. А. Конструкции и параметры механизмов шагания для комплекса добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* 2023. № 11–1. С. 159–174. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_159.
3. Каширский А. С., Рахутин М. Г., Кириченко Ю. В., Кузин Е. А., Иващенко Г. С. Расчет производительности и обоснование параметров кассетного трала для добычи железомарганцевых конкреций // *Горная промышленность.* 2020. № 1. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-155-159.
4. Патент № 2788227 РФ. Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых / Д. А. Юнгмейстер, В. А. Шпенст, А. В. Григорчук, А. И. Исаев, М. П. Смоленский. Заявка № 2022123385 от 01.09.2022; опублик. 17.01.2023. Бюл. № 2.

ДВА ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПА РУДОНОСНЫХ ОСАДКОВ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

Габлина И.Ф.¹, Черкашев Г.А.², Люткевич А.Д.¹

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия

²ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия
igabl@rambler.ru

На основе материалов, полученных в рейсах НИС «Профессор Логачев» рассмотрены особенности двух генетических типов рудоносных и металлоносных осадков, развитых в пределах Российского Разведочного Района Срединно-Атлантического Хребта (САХ).

Объектами наших исследований были сульфидные руды, карбонатные, рудоносные и металлоносные осадки гидротермальных полей Логачев-1, Ашадзе-1, Зенит-Виктория, Петербургское, Восточное (4) рудного узла Семенов, рудного узла Победа Срединно-Атлантического хребта (САХ), открытых в рейсах НИС «Профессор Логачев», проводившихся ФГУНПП «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» в период 2003–2015 гг. Нами был изучен материал, полученный в рейсах №№ 26 (2005 г.), 30 (2007 г.), 32 (2009 г.), 33 (2010 г.), 37 (2015 г.). Многолетние исследования металлоносных и рудоносных океанских осадков зарубежными и российскими специалистами показали, что в их формировании принимают участие различные процессы: наряду с обогащением донных осадков рудным материалом, выпавшим из гидротермальных плюмов (1 генетический тип), установлены рудоносные осадки, сформированные под воздействием рассеянных (диффузных) гидротермальных флюидов, поступающих в них из субстрата (2 генетический тип).

Рудные поля расположены на бортах рифтовой долины САХ в районе от 13° (рудный узел Семенов) до 20°08'с.ш. (поле Петербургское) на глубинах от ≈ 2400 до 4200 м. Активные гидротермальные постройки на них редки, но зафиксированы гидрофизические аномалии и гидротермальная фауна. В строении рудных полей принимают участие базальты, габбро и перидотиты, карбонатные, металлоносные и рудоносные осадки с включениями сульфидных руд. Фоновые карбонатные (до 75–90% CaCO₃) осадки представлены кальцитовыми раковинами фораминифер, кокколитов и птеропод с примесью глинистого и эдафогенного материала. Они имеют максимальную мощность 100–140 см, распространены на периферии рудных полей и за их пределами. В зонах рудных тел развиты металлоносные и рудоносные осадки мощностью до 35–60 см. Возраст осадков голоцен-позднеплейстоценовый (0–128 тыс. лет).

Осадки изучены комплексом методов, включающим измерение физико-химических параметров в рейсах, оптическую и электронную микроскопию, биостратиграфическое и изотопное датирование, химические и рентгеновские методы.

Два установленных генетических типа осадков различаются по ряду морфологических, структурных и минералого-геохимических признаков (табл. 1).

Первый тип рудоносных и металлоносных осадков, формирующихся в условиях современной гидротермальной деятельности, обычно слагает самый верхний горизонт осадочного чехла и может распространяться на десятки километров от источника. Eh и pH их поровых вод близки к физико-химическим параметрам морской воды (табл. 1).

Второй тип рудоносных осадков, сформированный под влиянием гидротермальных флюидов, обычно приурочен к нижней части колонок - базальным горизонтам, иногда развивается послойно. Влияние гидротермальных флюидов отражается в изменении Eh и pH поровых вод (табл. 1). Его распространение ограничено пределами рудных полей, вблизи фокусированных гидротермальных источников.

Таблица 1. Отличительные признаки генетических типов рудоносных осадков

Основные характеристики	Осадки, сформированные:	
	при выпадении из плюма (1 тип)	под воздействием флюидов (2 тип)
Положение в разрезе	Преимущественно верхний горизонт	Нижняя часть разреза, отдельные прослои в средней части
Положение относительно рудных тел	Распространение вблизи сульфидных построек и за пределами рудных полей	Распространение в пределах рудных полей
Физ.-хим. характеристики поровых вод	Eh +116 ... +500 мВ pH 7.8	Eh – 105 ... –139 мВ pH 6.8–7.2
Сохранность карбонатных раковин микроорганизмов	Хорошая сохранность	Общая численность и видовое разнообразие снижены
Минералы-индикаторы	Изокубанит, пирротин, барит, минералы группы атакамита, гетит, оксиды марганца, биогенный кальцит	Ангидрит, доломит, арагонит, барит, пирит, халькопирит, сульфиды меди
Текстурно-структурные особенности рудных минералов	Обломки, кристаллы, каймы замещения, псевдоморфозы гидроксидов железа по сульфидам, мономинеральные выделения гидроксидов железа	Структуры метасоматического замещения сульфидами, сидеритом, арагонитом кальцитовых раковин микроорганизмов

В минеральном составе металлоносных и рудоносных осадков, выпавших из плюма, преобладают оксидные минералы (гидроксиды железа, оксиды марганца, атакамит), присутствуют кристаллики или обломки сульфидов, в различной степени замещенные окси-гидроксидами железа (рис. 1а, б), кальцитовые раковины микроорганизмов хорошей сохранности. Среди сульфидов присутствуют изокубанит (рис. 1б) и реликты пирротина, замещенного пиритом. В рудоносных осадках, сформированных в базальных горизонтах под воздействием флюидов, высокотемпературные сульфиды (изокубанит, пирротин) практически не встречаются. Наиболее распространены пирит и халькопирит, сульфиды меди в ассоциации с вторичными карбонатами (кальцит, арагонит, доломит) и силикатами (опал, тальк, хлорит и др.). Кальцитовые раковины практически отсутствуют, т.к. почти полностью замещены гидротермальными минералами (рис. 1в, г).

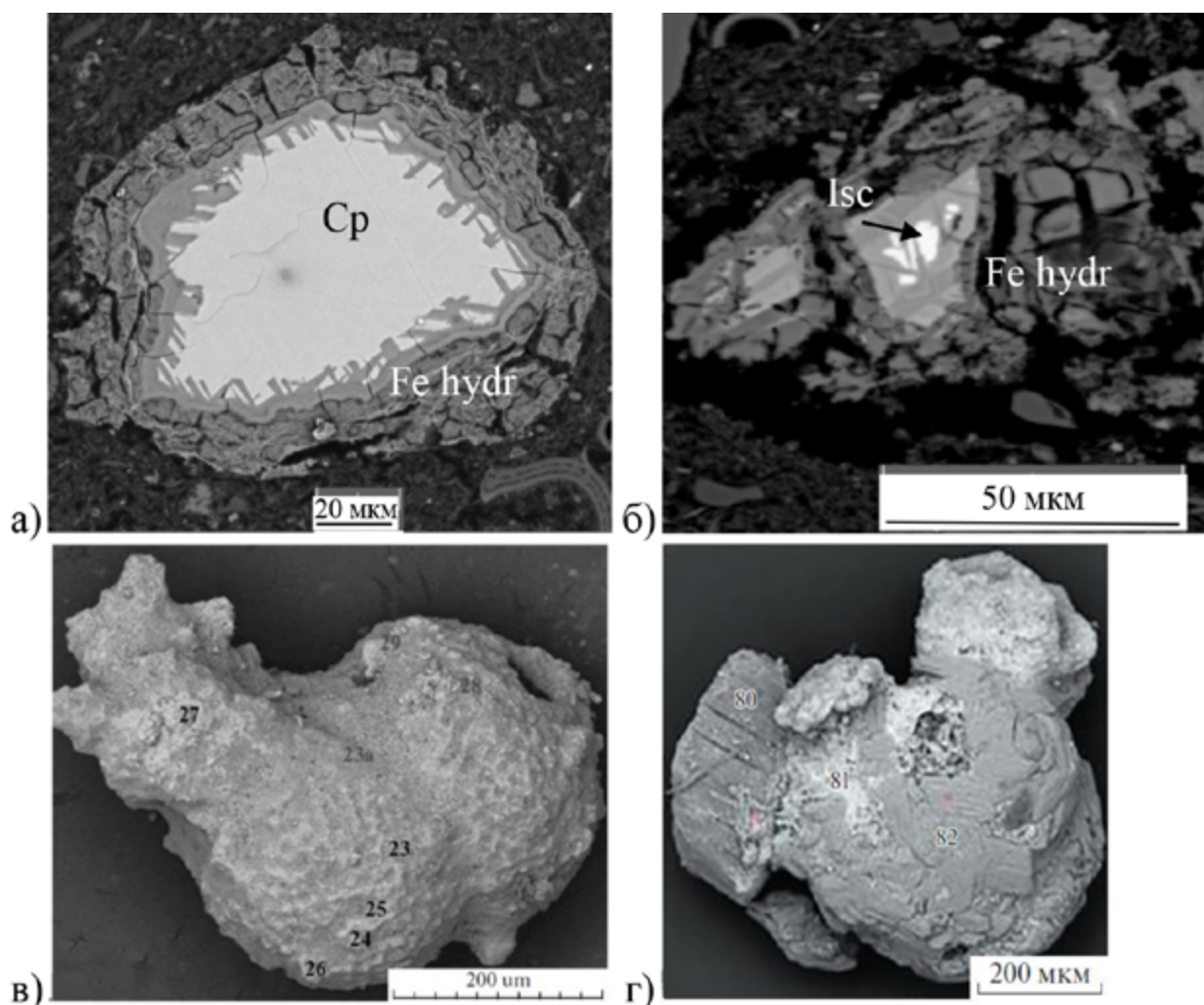


Рис.1 Гидротермальные минералы в осадках 1-го (а, б) [1] и 2-го типа (в, г) [2, 3]. Фотографии в отраженных электронах. а — каймы замещения и обрастания гидроксидов железа (Fe hydr) вокруг кристалла халькопирита (Cp); б — реликты изокубанита (Isc) в гидроксидах железа; в — псевдоморфоза сильно окисленного пирита (ан. 23–26) с включениями сульфидов Cu (ан. 27) по двухкамерной раковине *Globigerinoides* sp. с реликтами пористой структуры и устьем; г — кристаллы ангидрита (ан. 82) по раковине фораминиферы, с атакамитом в пустотах (ан. 81) и «приросший» кристалл серпентина (ан. 80).

Содержания элементов в поверхностном и базальном горизонтах колонок рудоносных осадков различаются при преобладании Fe_2O_3 в обоих типах. Содержание Fe_2O_3 (вес. %) в поверхностном горизонте от 4,02 до 14,88, Cu от 0,094 до 1,88, Zn от 0,017 до 0,23; в нижнем горизонте Fe_2O_3 от 25,83 до 43,88; Cu от 0,67 до 1,8; Zn от 0,038 до 1,38; содержание Sobщ в поверхностном горизонте от 0,02 до 2,67, в нижнем горизонте от 0,04 до 35,99. Значимая положительная корреляция наблюдается между содержанием Fe_2O_3 , Zn и глубиной горизонта по разрезу колонки (коэффициенты корреляции 0,81 и 0,68 соответственно). При этом корреляционная связь у меди и Sobщ с глубиной слабая или отсутствует (коэффициенты корреляции 0,38 и 0,28 соответственно). Сравнение химического состава проведено по колонкам осадков, где гидротермально-метасоматические процессы в базальном горизонте проявлены наиболее отчетливо: 26L1475 (поле Ашадзе-1), 33L159g (поле Петербургское) и 37L184k (рудопроявление Победа-3).

Список литературы

1. *Люткевич А.Д., Габлина И.Ф., Наркевский Е.В.* и др. Минералы-индикаторы гидротермальной деятельности в поверхностном слое донных осадков гидротермального узла Победа ($17^{\circ}07.45' - 17^{\circ}08.7'$ с.ш. САХ) // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 4. С. 338-358.
2. *Габлина И.Ф., Попова Е.А., Садчикова Т.А.* и др. Гидротермально-метасоматические изменения карбонатных донных осадков поля Ашадзе-1 (13° с.ш. Срединно-Атлантического Хребта) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 5. С. 399-422.
3. *Габлина И. Ф., Добрецова И. Г, Попова Е. А.* и др. Минеральный состав и геохимическая зональность донных осадков гидротермального узла Победа ($17^{\circ}07.45' - 17^{\circ}08.7'$ с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // Литология и полезные ископаемые. 2021. № 2. С. 101–121.

ISBN 978-5-88994-134-7



Сборник тезисов

Конференция

«ОСВОЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ
МИРОВОГО ОКЕАНА»

Компьютерная верстка Е. В. Бурькиной, корректор В. М. Гончар

Подписано в печать 07.06.2024. Формат 60×90 1/8

Уч.-изд. л. 5. Усл. печ. л. 6. Тираж 300 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в секторе издания научно-технической продукции ФГБУ «ВНИИОкеангеология»
190121, СПб., Английский пр., д. 1

