ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



*Научная статья*
УДК 622.271.5

# О возможности уменьшения техногенной нагрузки на придонные биоценозы при добыче твердых полезных ископаемых с использованием технических средств различной модификации

**С.М.СУДАРИКОВ, Д.А.ЮНГМЕЙСТЕР, Р.И.КОРОЛЕВ ✉, В.А.ПЕТРОВ**
*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Судариков С.М., Юнгмейстер Д.А., Королев Р.И., Петров В.А. О возможности уменьшения техногенной нагрузки на придонные биоценозы при добыче твердых полезных ископаемых с использованием технических средств различной модификации // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 82-96. DOI: 10.31897/PMI.2022.14

***Аннотация*.** Проанализированы особенности видового состава и разнообразия сообществ живых организмов в пределах рудных полей железомарганцевых конкреций (поле Кларион-Клиппертон), кобальт-марганцевых корок (подводные Магеллановы горы) и глубоководных полиметаллических сульфидов (Ашадзе-1, Ашадзе-2, поля Логачев и Краснов) в Российских разведочных районах Тихого и Атлантического океанов. Рассмотрены перспективы освоения твердых полезных ископаемых Мирового океана с возможно меньшим ущербом для морских экосистем: образование шлейфов осадочного материала и замутнение значительных объемов воды в результате операций сбора полезного ископаемого; сохранность гидротермальной фауны и микробиоты, в том числе в зоне влияния высокотемпературных гидротермальных источников. Рассмотрены различные концепции и варианты компоновки устройств глубоководных добычных комплексов (Индийская и Японская концепции, концепции компании Nautilus Minerals и СПГУ) на предмет их эффективности работы. Выделены основные типы механизмов, из которых состоят комплексы с выставлением оценок на основании установленных приоритетов: экология (воздействие на придонную среду); затраты на их изготовление и эксплуатацию; удельные энергозатраты (технико-экономические показатели). На основании представленного морфологического анализа обоснована компоновка глубоководного сборщика полезных ископаемых (устройства с камерами разряжения и механизмом шагания на рукоятях), выбранного по ключевому приоритету «экология». Проведены предварительные экспериментальные исследования физико-механических свойств образцов кобальт-марганцевых корок методом наложения двухстороннего осевого усилия сферическими шариками (инденторами) с построением паспорта прочности породы для оценки дальнейших результатов экспериментальных исследований. Проведены экспериментальные исследования разрушения кобальт-марганцевых корок ударом и резанием с выделением требуемой ударной нагрузки и осевого усилия резания для реализации схемы сбора исполнительным органом грейферного типа со встроенным ударником.

***Ключевые слова*:** кобальт-марганцевые корки; железомарганцевые конкреции; глубоководные полиметаллические сульфиды; морские экосистемы; освоение минеральных ресурсов океана; глубоководный сборщик; грейферный исполнительный орган; камеры разрежения; концепция глубоководной добычи; параметрический анализ

***Принята: 07.04.2022*** ***Онлайн: 04.05.2022*** ***Опубликована: 29.04.2022***

**Введение.** Руды, образующие скопления на дне Мирового океана вызывают не только большой научный [1-3], но и практический интерес, связанный с изучением возможности их добычи [4-6]. Работы по контрактам между РФ и Международным органом по морскому дну при ООН ведутся по трем видам океанических твердых полезных ископаемых (ТПИ) в международных районах морского дна: железомарганцевым конкрециям (ЖМК) в пределах Российского разведочного района (РРР-ЖМК) в поле Кларион-Клиппертон (Тихий океан); кобальт-марганцевым коркам (КМК) Российского разведочного района (РРР-КМК) в пределах Магеллановых гор (Тихий океан) и глубоководным полиметаллическим сульфидам (ГПС) Российского разведочного района (РРР-ГПС) в пределах Срединно-Атлантического хребта (САХ). В число основных задач по решению вопроса



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

о возможном освоении минеральных ресурсов океана ставятся: проектирование глубоководных аппаратов для добычи руд (сборщиков); защита и сохранение морской среды, в том числе уникальных экосистем, заключающихся в разнообразии биологических сообществ рудных полей абиссальных равнин, срединно-океанических хребтов и подводных гор Мирового океана [7].

**Постановка проблемы.** Для обоснования рациональных параметров технических средств для промышленной добычи глубоководных ТПИ, которые будут минимально воздействовать на придонные экосистемы, необходимо исследовать все особенности видового состава и разнообразия придонных сообществ живых организмов Мирового океана: ЖМК, КМК и ГПС. Описание придонных организмов велось по фондовым материалам ФГБУ ВНИИОкеангеология, полученным в ходе рейсов АО «ПМГРЭ» и «Южморгеология».

*Подводная фауна районов железомарганцевых конкреций.* ЖМК представляют собой новый вид минерального сырья, который содержит стратегически значимые металлы для черной (Mn) и цветной (Ni, Cu, Co) металлургии, по содержанию и ресурсному потенциалу не уступающие эксплуатируемым наземным рудным объектам, выгодно отличающиеся от них комплексным составом и сорбционными свойствами [8].

РРР-ЖМК приурочен к рудной провинции Кларион-Клиппертон размерами порядка 5000 × 10000 км в центральном абиссальном бассейне Тихого океана. Более половины территории провинции представляет собой плоское горизонтальное поле на глубинах 4000-6000 м, осложненное отдельными меридионально ориентированными хребтами и подводными горами высотой до 2500 м. Осадочные породы ниже глубин 4200-4500 м (критическая глубина карбонатонакопления) представлены исключительно глинами, выше могут быть отмечены карбонатные породы [9]. Поле населено разнообразными представителями эпифауны, которые обеспечивают среду обитания для других видов.

В экспедициях АО «Южморгеология» и зарубежных публикациях [10-12] отмечались представители макрофауны (многочисленные многощетинковые черви (класс *Polychaeta*) и ракообразные из отрядов танаид (*Tanaidacea*) и изопод (*Isopoda*), представители мейофауны (нитчатые черви нематоды и ракообразные из отряда гарпактикоид (*Harpacticoida*), эпифауны (представители полипоидной стадии сцифоидных полипов из рода *Stephanoscyphus*, колонии мшанок, ксенофиофориды, обитающие в известковых трубках полихеты из семейства *Serpulidae*) и инфауны конкреций (безраковинные фораминиферы в основном). Одним из таких существ является прозрачный анемон (*Losactis vagabunda*), который прокладывает свой путь через осадок и может поглощать червей в шесть раз больше собственной массы. К относительно крупным животным на абиссальных равнинах относятся голотурии, морские ежи и звезды (рис.1).

Несмотря на отсутствие крупных сообществ морских организмов и благоприятные особенности морфологии рудных залежей, идея масштабной добычи ЖМК встречает активное сопротивление у ряда экспертов, которые считают, что добыча конкреции может привести к заметному ущербу для среды обитания и исчезновению уникальных видов. Физическое восстановление марганцевых конкреций занимает миллионы лет [13]. В качестве аргумента приводятся наблюдения, проводившиеся спустя 26 лет на месте экспериментальной добычи конкреций из зоны разлома Кларион-Клиппертон. Обнаружено, что следы работы горнодобывающих механизмов все еще хорошо видны, а сообщества донных организмов до конца не восстановились [14].

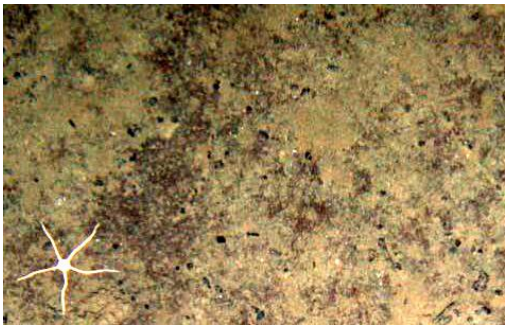


Рис.1. Железомарганцевые конкреции на поле Кларион-Клиппертон, Тихий океан (13° с.ш. и 133° в.д.)

*Подводная фауна районов кобальт-марганцевых корок.* РРР-КМК в Тихом океане находятся на подводных Магеллановых горах на глубинах 1400-3500 м [15]. Кобальт-марганцевые корки формируются на склонах крупных горных сооружений с плоской вершиной – гайотов, поднимающихся более чем на километр от морского дна. Вершинное плато гайота обычно покрыто рыхлыми карбонатными осадками и является безрудной зоной. По периферии вершинного плато пологие поверхности с уклонами от 0-5° до 12-20° практически всегда свободны от



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2022. Т. 253. С. 82-96 DOI: 10.31897/PMI.2022.14
© С.М.Сударикова, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022

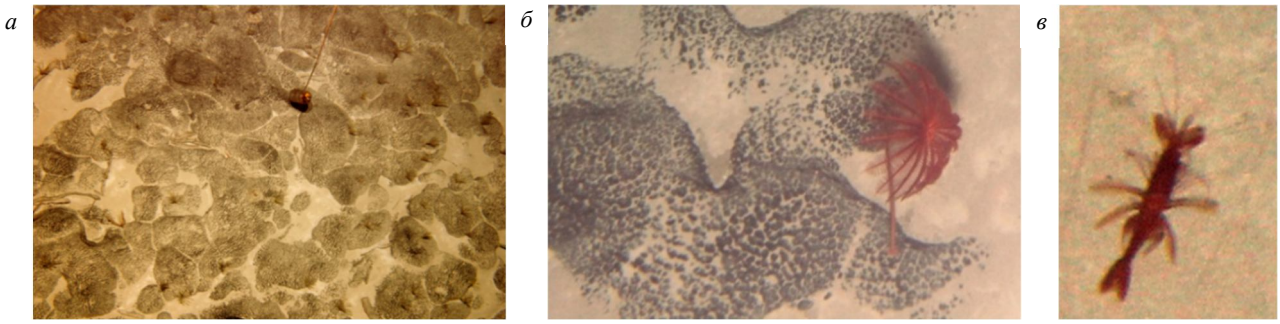


Рис.2. Морские лилии из отрядов *Comatulida* (*а*) и *Proisicrinus ruberrimus* (*б*) (гайот Альба, 16°52′ с.ш. и 154°4′ в.д.); ракообразные из рода *Aristaemorpha* (семейство *Aristidae*) (*в*) (гайот Коцебу, 17°25′ с.ш. и 153°10′ в.д.)

осадков, и на обнаженных коренных породах развиты наиболее мощные КМК. Обычно это сплошные ненарушенные покровы, редко присыпанные карбонатными осадками. Примерно 2/3 поверхности дна представлены твердым субстратом в форме корковых образований или ЖМК, иногда с небольшим количеством рыхлого осадка (рис.2, *а*). Остальная поверхность покрыта преимущественно маломощным осадком. КМК развиты на обнаженных поверхностях коренных пород, в то время как конкреции приурочены к зонам развития нелитифицированных осадков (рис.2, *б*). Наиболее перспективными для обнаружения богатых рудных полей КМК считаются подводные горы мелового возраста, вершины которых расположены не глубже 1400-1600 м [16].

Состав и разнообразие придонной фауны зависит от глубины продуктивных склонов и количества осадков. Подводные горы на глубине трех и более километров по характеру экосистем сходны с абиссальными равнинами. Менее глубоководные гайоты, отличающиеся наличием кораллов, анемонов, перьевых звезд и губок, иногда сравнивают с оазисами, которые используются некоторыми из мигрирующих видов в качестве районов кормления [17]. В связи с этим рекомендуется классифицировать подводные горы как уязвимые морские экосистемы [18].

Следует отметить, что придонная фауна на гайотах почти исключительно сосредоточена на плоских вершинах, покрытых осадками, к которым приурочены основные объекты промышленного интереса.

В экспедициях АО «Южморгеология» и зарубежных публикациях [7, 18] отмечается частое преобладание морских лилий. Среди животных отмечаются ракообразные, относящиеся к отряду десятиногих (*Decapoda*) (рис.2, *в*). Из крупных декапод можно выделить относящихся к роду *Nematocarcinus* (семейство *Nematocarcinidae*) и представителя семейства *Polychelidae*. На участках дна, покрытых осадками, относительно высокой численности достигают коралловые полипы, относящиеся к отряду морских перьев (*Pennatulacea*). Встречаются актинии (отряд *Actiniaria*), цериантарии (отряд *Ceriantharia*), мягкие кораллы (отряд *Alcyonacea*), стеклянные губки (класс *Hexactinellida*) и рыбы, относящиеся к классу лучеперых (*Actinopterigii*).

Численность крупных представителей поверхностной фауны достаточно низкая (не превышает 70-100 особей/га). Более многочисленными являются мелкие представители глубоководного бентоса, населяющего осадки, в особенности организмы мейофауны: их количество может достигать около 3000 особей на 0,25 м$^2$. Однако мощность осадков на гайотах редко превышает 10 см.

*Подводная фауна районов глубоководных полиметаллических сульфидов.* Месторождения ГПС отличаются широким распространением и приуроченностью к различным геолого-геоморфологическим условиям. Рассматриваемые гидротермальные поля приурочены к центрам спрединга или срединно-океаническим хребтам. Гидротермальные системы в пределах подобных структур можно отнести как к ультраосновным породам внутренних океанических комплексов (ВОК), так и базальтам. Поля могут располагаться в широком интервале глубин (от первых сотен до 4000 м и выше) в пределах различных геоморфологических структур: в центральной осевой части срединно-океанического хребта; на фланге срединно-океанического хребта; склоне рифтовой долины; в пределах трансформных разломов и горячих внутриплитных точек.

Наличие активной гидротермальной деятельности является основным фактором, определяющим разнообразие видов, встречающихся вблизи глубоководных гидротермальных систем Мирового


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

океана. Гидротермальные растворы, циркулирующие по системе трещин, обогащаются множеством элементов в результате серпентинизации, выщелачивания и т.д. Высокие концентрации таких элементов, как $H_2S$, $H_2$, $CH_4$, $NH_3$, $Mn^{2+}$ и $Fe^{2+}$, поддерживают микробный метаболизм в гидротермальных системах и плюмах [19-21]. Гидротермальные плюмы («дымы курильщика») представляют собой результат взаимодействия «питательного» гидротермального флюида и окружающей морской воды [22].

Обнаруженные на САХ гидротермальные сообщества живых организмов не являются исключением. В них обычно доминируют двустворчатые моллюски *Bathymodiolus spp*., слепые креветки *Rimicaris exoculata*, образующие крупные колонии на стенках «черных курильщиков», различные полихеты *Polynoid polychaetes*, крабы *Segonzacia mesatlantica* и некоторые малочисленные виды гидротермальных рыб. Тесные связи между бактериальным первичным продуцентом и потребителем объясняют большую часть биологического изобилия глубоководных гидротермальных источников.

Последние результаты моделирования распределения активных гидротермальных систем показали, что количество неоткрытых гидротермальных полей сильно недооценено (как минимум в 3-6 раз). Переоценка приведет к пересмотру характера распределения глубоководной гидротермальной фауны и увеличению биогеохимического вклада гидротермальных источников (в том числе низкотемпературных диффузионных) [23, 24]. Исследования показали, что даже неактивные гидротермальные системы, обладающие обширными залежами ГПС, могут быть интересны для горнодобывающих компаний. Подобные области также обладают эндемичными ассоциациями организмов, нуждающихся в защите и сохранении при проведении работ по добыче ГПС [25].

В пределах РРР-ГПС можно выделить четыре типичных гидротермальных участка, отличающихся по гидротермальной активности, количеству и плотности гидротермальной фауны, а также видовому разнообразию изученных сообществ.

1. *Рудный узел Ашадзе, рудное поле Ашадзе-1.* Активная гидротермальная деятельность на поле Ашадзе-1 была детально изучена с дистанционно управляемого многофункционального аппарата ROV Victor 6000 в российско-французской экспедиции SERPENTINE на научно-исследовательском судне (НИС) «Pourquoi Pas?» в 2007 г. [26-28].

Гидротермальное поле Ашадзе-1 на САХ является самым глубоким (4080 м) и располагается в пределах ступенчато-сбросовых ультрамафитовых породах, слагающих внутренние океанические комплексы, – серпентинитах, гарцбургитах (перидотитах), пироксенитах. Гидротермальная деятельность контролируется глубинными тектоническими нарушениями (детачментами) [29].

На большей части поля наблюдаются низкотемпературные источники (до 113 °С) с малым дебитом. К ним приурочено большое количество неактивных сульфидных труб, покрытых желтыми оксидами, встречаются постройки черного цвета, характерного для свежих сульфидов слабоактивных «курильщиков» (рис.3, *а*). Однако большинство гидротермальных построек приурочено к нескольким источникам с температурой выше 347 °С. Следует отметить повышенную кислотность гидротермальных растворов (pH = 2-4).

С точки зрения видового состава и разнообразия, гидротермальное поле Ашадзе-1 имеет некоторые интересные биологические особенности. Практически полностью отсутствуют многочисленные популяции симбиотических видов, в частности, *Rimicaris exoculata* [26]. В то же время два вида, известные в других районах как периферийные, образуют большие популяции, которые колонизируют доступную среду – анемоны (актинии, преимущественно *Maractis rimicarivora*) и хетоптериды (рис.3, *а*).

На наружных стенках высокотемпературных «курильщиков» присутствует три вида креветок в порядке убывания численности: *Mirocaris fortunata*, *Chorocaris chacei* и *Rimicaris exoculata*. Последний вид обычно встречается на САХ в виде скоплений в несколько тысяч особей, но было найдено только семь образцов [26].

В окисленной и активной зонах диффузионной низктемпературной разгрузки обнаружены небольшие популяции гастропод *Ashinkailepas* (*aff*) *briandi* (около 10 особей), плоские черви и бактериальные маты. Температура составляла около 10 °С. В окисленных зонах наблюдается большое количество трубок хетоптерид, вероятно, рода *Spiochaetopterus*. Эти трубки образуют большие скопления у основания «курильщиков» и используются в качестве субстрата для других видов и бактериальных матов. Также наблюдалась разнообразная ассоциированная фауна [26].



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

*Записки Горного института.* 2022. Т. 253. С. 82-96 DOI: 10.31897/PMI.2022.14
© С.М.Сударикова, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022

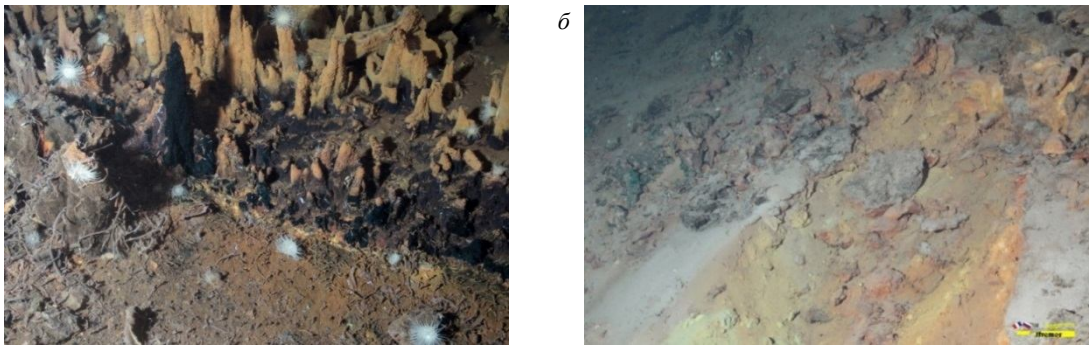


Рис.3. Ландшафт дна на участке Ашадзе-1 с преобладанием дезинтегрированного материала разрушающихся неактивных труб «курильщиков» и популяцией морских анемон *Maractis rimicarivora* и трубок червей *Chaetopterids* (12°58′ с.ш. и 45°30′ з.д.) (*а*); окисленные сульфидные руды поля Ашадзе-2 (12°58′ с.ш. и 45°30′ з.д.) (*б*) [26]

2. *Рудный узел Ашадзе, гидротермальное поле Ашадзе-2.* Поле Ашадзе-2 представляет собой слабоизученный гидротермальный кратер и прилегающую гряду пологих холмов на западном борту рифтовой долины САХ в пределах того же внутреннего океанического комплекса, что и поле Ашадзе-1. Холмы сложены окисленными в разной степени сульфидами (рис.3, *б*). Однако гидрофизическое зондирование показало наличие в пределах данного поля гидрофизических аномалий. Вмещающие породы и тектонические условия аналогичны рассмотренному ранее полю Ашадзе-1 [29].

В центральной части гидротермального кратера располагается относительно недоступная область высокотемпературной разгрузки, где были обнаружены только отдельные креветки из вида *Mirocaris fortunata*. В зоне дробления вокруг кратера с «черными курильщиками» существует необычная по составу сообществ зона диффузии с температурой выше 12 °С.

Среди редких представителей фауны наблюдались различные губки и популяция моллюсков. Каменные блоки покрыты необычной слизистой оболочкой неизвестного происхождения. Это атипичное образование имело ограниченное распространение и, возможно, связано с органическим обогащением [26].

3. *Гидротермальное поле Логачев.* Поле Логачев было обнаружено в 1993-1994 гг., во время седьмого рейса НИС «Профессор Логачев» [30]. Поле неоднократно исследовалось в международных экспедициях, в том числе с использованием подводных обитаемых аппаратов [29]. Наиболее полные исследования поля, включавшие зондирование придонных вод, детальное картирование, фото- и видеосъемку, геологическое и биологическое опробование, проводились с борта подводного аппарата Элвин во время экспедиции DIVERSEXPEDITION на НИС «Atlantis» (2001) и с ROV Victor 6000 в российско-французской экспедиции SERPENTINE на НИС «Pourquoi Pas?» в 2007 г. [26, 27, 31].

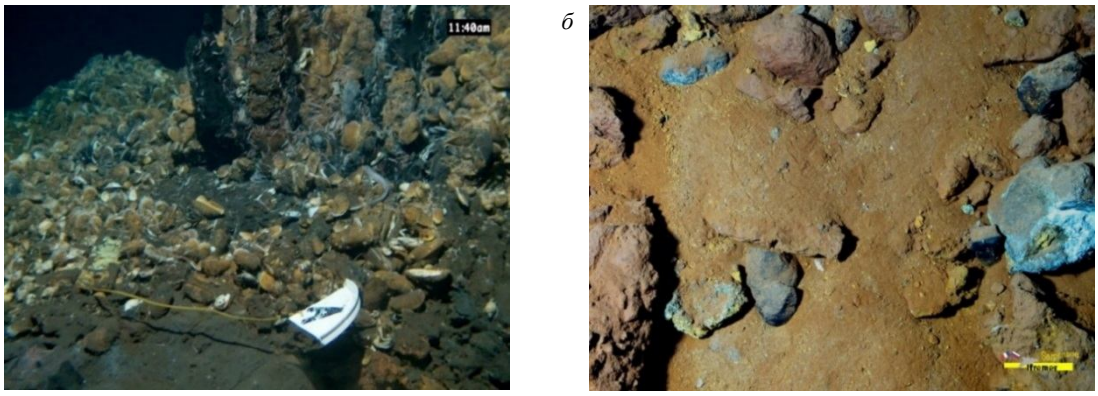
По всей площади поля распределены семь групп «черных курильщиков» и гидротермальных кратеров с температурами растворов 348-352 °С, а также большое количество зон диффузионного высачивания теплых вод с температурой 10-20 °С. Все зоны разгрузки колонизированы многочисленными биологическими сообществами [32]. Геолого-тектонические условия схожи с условиями гидротермального поля Ашадзе. Гидротермальное поле Логачев также приурочено к габбро-перидотитовым породам внутреннего океанического комплекса, а гидротермальная деятельность контролируется детачментами [33].

Наиболее яркие характеристики этого гидротермального поля: большое количество мидий *Bathymodiolus puteoserpentis*, гастропод *Phymorhynchus ovatus* и скоплений слепых креветок *Rimicaris exoculata* (рис.4, *а*). В меньшем количестве распространены креветки *Chorocaris chacei* и *Alvinocaris sp*. Другой характеристикой участков поля Логачев является многочисленное обилие хрупких звезд *Ophioctenella acies*. Исследования показали рост популяций различных видов – биомасса грядок мидий увеличилась, в том числе в зонах диффузионной разгрузки «мерцающих» теплых растворов.


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.14

*Записки Горного института.* 2022. Т. 253. С. 82-96
© С.М.Сударикова, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022




*а* *б*

Рис.4. Поле Логачев: креветки, крабы, мидии и гастроподы у группы источников Ирина-2 (14°45,17′ с.ш. и 44°58,75′ з.д.), экспедиция DIVERSEXPEDITION (*а*) [31]; поле Краснов, экспедиция SERPENTINE (*б*) [26]

4. *Гидротермальное поле Краснов.* Включает в себя одно из крупнейших в пределах РРР-ГПС рудных тел, сложенное в основном массивными окисленными сульфидами железа (рис.4, *б*). Детальная батиметрическая съемка и опробование впервые проводились на поле Краснов в российско-французской экспедиции SERPENTINE на НИС «Pourquoi Pas?» в 2007 г. [26]. Поле приурочено к базальтам и располагается в месте сопряжения восточного борта рифтовой долины и нетрансформного разлома на глубинах 3700-4000 м [33].

Гидротермальная активность на поле Краснов не наблюдалась, поэтому фауна, обычно связанная с гидротермальной разгрузкой, не обнаружена. Тем не менее зафиксированы достаточно толстые покровы бактериальных матов. Эти наблюдения позволяют допустить возможность разгрузки теплых растворов сквозь рыхлую толщу окисленных сульфидов. Кроме того, в одной из полостей в сульфидно-оксидной толще анемон, морфология которого напоминает *Boloceroides daphnae*, описанный на гидротермальных полях Восточно-Тихоокеанского поднятия (первое наблюдение этого анемона на САХ).

Приведенная типизация гидротермальных полей на основе особенностей распределения придонных организмов, характера рудных скоплений и гидротермальной активности позволяют сделать выводы с точки зрения возможности освоения минеральных ресурсов.

1. Высокая температура и агрессивный характер кислых (pH = 2-4) флюидов «черных курильщиков» на участках повышенной гидротермальной активности (типа поля Логачев) усложняют работу механизмов для добычи ГПС. Поэтому создание техники, устойчивой к высокотемпературным агрессивным растворам для работ в этих условиях, невозможно на сегодняшний день.

2. Обильная и уникальная фауна активных гидротермальных полей не позволяет применять известные механизмы для выполнения добычных работ в зоне действующих «курильщиков» на полях высокой и средней активности (типа Логачев, Ашадзе-1). Добыча руды в этих условиях невозможна без нанесения серьезного вреда колониям гидротермальных сообществ живых организмов вблизи глубоководных гидротермальных систем океана. В то же время на полях малой и средней активности (типа Ашадзе-1, -2) возможен выбор неактивных участков, доступных для разработки.

3. Отсутствие высокотемпературной разгрузки рудообразующих растворов и гидротермальной фауны на неактивных гидротермальных полях (типа Краснов, Ашадзе-2) наиболее благоприятно для освоения минеральных ресурсов с использованием технических средств, разрабатываемых также для освоения скоплений ЖМК и КМК.

4. Следует помнить, что определенное количество придонных организмов, особенно микробиоты, присутствует и на неактивных гидротермальных полях. Поэтому очень важно при выборе технологии и средств механизации процессов сбора КМК, ЖМК и ГПС выбирать конкретные исполнительные органы механизмов, которые бы минимально механически воздействовали на дно.

Таким образом, геолого-геоморфологические условия распространения основных ТПИ Мирового океана (ЖМК, КМК, ГПС) принципиально отличаются друг от друга. Если ЖМК расположены на относительно выровненных площадках, что упрощает их освоение, то КМК зачастую



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.М.Сударикова, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022

находятся на склонах гайотов. Наиболее сложными условиями отличаются месторождения ГПС. Для них характерно большое разнообразие глубин распространения, а также вмещающих пород и структур, к которым они приурочены. Кроме контрастных различий в условиях залегания, районы будущей добычи различных видов ТПИ принципиально отличаются по характеру придонных экосистем вблизи месторождений. Учитывая все условия, можно сделать вывод, что на данный момент невозможно создание универсального комплекса для освоения всех перечисленных ТПИ океана, который бы обеспечил сохранение придонных экосистем.

**Методология.** Рассмотрение технических средств добычи с минимизацией экологического воздействия следует проводить для устройств сбора КМК и ЖМК, так как их техническое исполнение возможно.

Для промышленной добычи ГПС разработана и испытывается концепция Nautilus Minerals, заключающаяся в использовании технических решений, разработанных для сухопутной горной промышленности и адаптированных под глубоководную добычу [34]. Активно развивается Японская концепция, заключающаяся в использовании придонного агрегата на гусеничном ходу и исполнительными органами фрезерного типа [35, 36]. Данные концепции могут существенно воздействовать на окружающую среду.

В табл.1 и 2 представлен анализ вариантов компоновки глубоководных аппаратов для сбора ЖМК и КМК с выставлением оценки влияния десяти важнейших параметров по конкретным устройствам наиболее значимых концепций. Оценки (1 – максимум, 0 – минимум) являются числовым обозначением анализа экспертов и специалистов ВНИИОкеагеологии и ученых СПГУ, занимающихся тематикой глубоководной добычи. Оценка показывает, какое техническое решение в зависимости от параметров и выполняемых функций наиболее предпочтительно. Чтобы понять, как данная функция и устройство будут отвечать предъявляемым требованиям – влияние на экологию и обоснованные технико-экономические показатели – вводится коэффициент значимости, который будет неодинаковым.

В случаях, когда требуется разработать и обосновать устройства передвижения (табл.1), то приоритет «экология» является ключевым, так как существует возможность разработать устройства минимизирующие до приемлемого воздействие на окружающую среду.

В случаях разработки и обоснования устройств для сбора полезных ископаемых (табл.2) была выявлена зависимость – минимизируя воздействие на окружающую среду, уменьшается целесообразность и рентабельность добычи данных ископаемых. Устройств для приемлемой минимизации воздействия на окружающую среду нет даже в виде концептуальных разработок. Поэтому устройства для сбора будут разрабатываться на стыке двух приоритетов – экология и технико-экономические показатели. В табл.2 представлены оба коэффициента значимости и суммарные оценки с учетом данных коэффициентов, которые можно использовать при выборе средств для сбора глубоководных ТПИ, показывающие высокие технико-экономические показатели и оказывающие минимальное воздействие на окружающую среду.

*Таблица 1*

**Устройство перемещения придонных агрегатов (приоритет «экология»)**

| Функция | Коэффициент важности | Устройства с манипуляторами | Устройства шагающего типа | Гусеничный ход |
|---|---|---|---|---|
| Возможность снабжения разными захватывающими устройствами | 0,3 | 1 | 0,7 | 1 |
| Высокая скорость передвижения | 0,7 | 0,8 | 0,6 | 1 |
| Устойчивость во время работы | 0,6 | 0,9 | 0,8 | 0,9 |
| Простота основных узлов | 0,5 | 0,7 | 0,8 | 0,6 |
| Сохранение придонных областей | 1 | 1 | 0,5 | 0,4 |
| Высокая производительность сбора | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 1 |
| Наличие аналогов основных узлов в промышленности | 0,4 | 0,8 | 0,7 | 1 |
| Недопущение замутнения мелкодисперсным илом | 0,9 | 0,9 | 0,4 | 0,3 |
| Суммарная оценка | | 4,44 | 3,29 | 3,71 |


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

DOI: 10.31897/PMI.2022.14


© С.М.Сударикov, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022

*Таблица 2*

**Устройства для захвата придонных полезных ископаемых**

| Функция | Коэффициент важности | Устройства с манипуляторами и захватами в виде камер разрежения | Устройства с гидрорыхлителями и захватом струей воды | Устройства с нагребающими элементами (скребки, лапы, цепи) | Шнеки, отбойные штанги, диски, барабаны | Ковши на канатах или на цепях |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Высокая производительность | 1**, 0,5* | 0,6 | 0,7 | 1 | 0,8 | 0,5 |
| Возможность и простота селективного отбора | 0,2**, 0,6* | 1 | 0,8 | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| Минимальное механическое воздействие на придонные зоны | 0,3**, 1* | 0,9 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,5 |
| Минимальное создание замутнения | 0,5**, 0,9* | 0,9 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,5 |
| Низкие удельные энергозатраты | 0,8**, 0,4* | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0,7 | 0,6 |
| Высокий КПД | 0,9**, 0,3* | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,6 |
| Простота собственной конструкции и установки на плавательный аппарат | 0,6**, 0,2* | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9 |
| Минимальная стоимость изготовления | 0,7**, 0,8* | 0,7 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,9 |
| Возможность захвата и переноса материала в габаритах сборщика | 0,3**, 0,7* | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,8 | 0,9 |
| Суммарная оценка | | 3,92**/4,52* | 3,59**/3,4* | 4,52**/4,25* | 4,09**/3,7* | 3,58**/3,61* |

*Примечание.* * – соответствует максимальному приоритету требования «экология»; ** – соответствует максимальному приоритету требования «технико-экономические показатели».

Приоритет по параметру «экология» (замутнение, механическое воздействие на дно) выводит на высокие места устройства с камерами разрежения и механизмом шагания на рукоятях; по технико-экономическим показателям (стоимость, производительность, КПД) выделяет в качестве наилучших концепции с гусеничным ходом и гидротранспортом.

Для создания работоспособной конструкции по сбору глубоководных ЖМК и КМК необходимо рассматривать три варианта:

• для ЖМК мелкого и среднего размера (до 100 мм) без наличия уникальных форм флоры и фауны;

• для ЖМК и КМК со значительным разбросом среднего размера (50-250 мм) при наличии обильных уникальных форм флоры и фауны;

• для однородных КМК со сложными условиями залегания на склонах гайотов при наличии уникальных форм флоры и фауны.

Для первого варианта применима концепция с гусеничным сборщиком и вертикальным гидротранспортом. Полностью отвечает этим требованиям, например, Индийская концепция, заключающаяся в использовании гусеничного сборщика с барабанным исполнительным органом, конвейером и гибким трубопроводом, через который собранные ЖМК поднимаются на судно обеспечения насосным агрегатом [37-39]. Также следует рассматривать варианты таких компоновок с гидротранспортом, включающие в себя промежуточную насосную капсулу [40].

Для второго варианта возможно применение сборщика конструкции СПГУ (рис.5, *а*) с исполнительными органами в виде камер разрежения 1, которые способны притягивать большие конкреции и перемещать их в бункер. Камеры разрежения (рис.5, *б*) имеют форму полых пластин 2, в которых создается разрежение (относительно внешнего) давления, с присосками 3 на рабочей стороне, притягивающие полезное ископаемое 4 за счет разности давления. Камеры разрежения совершают цикличный сбор, прижимаясь к дну, притягивают конкреции и, отжимаясь от дна, переносят собранный материал в бункер.

Для третьего варианта также возможно применение концепции СПГУ. Отличие состоит в том, что исполнительные органы в виде камер разрежения, закрепленные на манипуляторах 5, заменены на грейферные ковши 6, оснащенные ударниками (рис.5, *в*) [41]. Эффективность грейферного



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

*Записки Горного института.* 2022. Т. 253. С. 82-96 DOI: 10.31897/PMI.2022.14
© С.М.Сударикov, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022

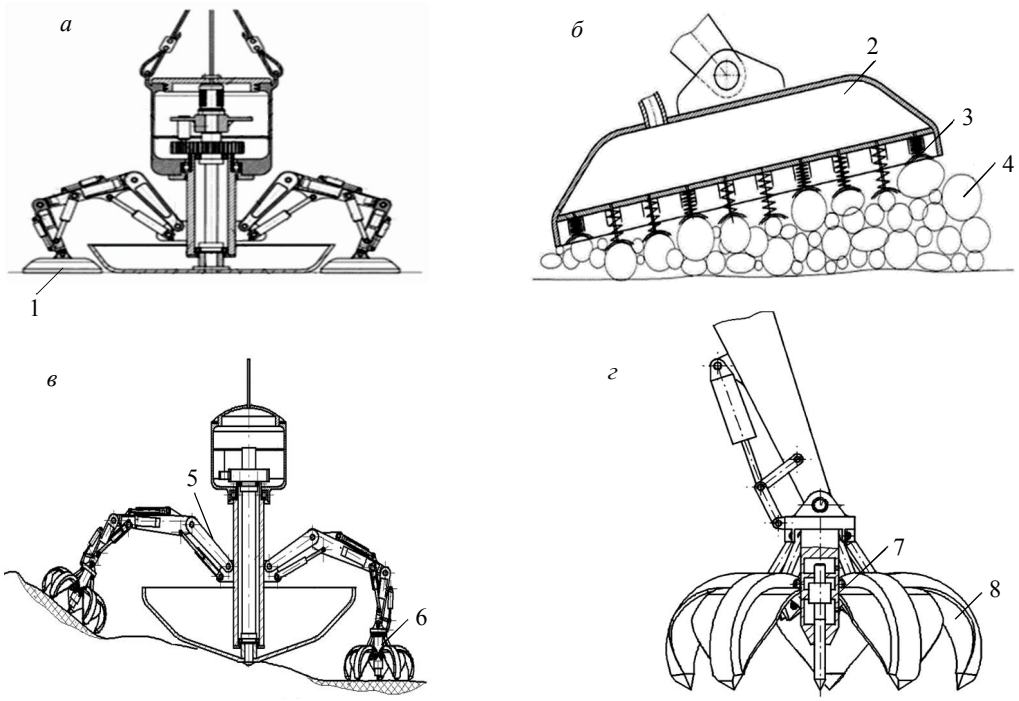



Рис.5. Сборщик шагающего типа с исполнительным органом в виде камер разрежения (*а*) и конструкция камеры разрежения в укрупненном виде [42, 43] (*б*); сборщик шагающего типа с грейферным исполнительным органом (*в*) и конструкция грейферного исполнительного органа со встроенным ударником [44] (*г*)

исполнительного органа (рис.5, *г*) с минимальным воздействием на окружающую среду будет достигаться выборочным и контролируемым сбором без повреждения подложки. При значительной крепости КМК, когда осевого усилия прижатия будет недостаточно для внедрения и смыкания челюстей 8, предлагается предварительно разупрочнить массив встроенным ударником 7, что позволит отделять КМК от подложки без дополнительного разубоживания.

Вариант концепции глубоководного комплекса со сборщиком конструкции СПГУ с улучшенными экологическими показателями представлен на рис.6, *а*.

Концепция сбора включает: вспомогательное судно 8 с двумя лебедками, расположенными на носу и корме; самоходные платформы 3 для размещения стационарного оборудования; оборудование энергообеспечения, включающее трансформатор 6, маслостанцию 5 и лебедку 4; самоходный агрегат для сбора (сборщик) 13; самоходный питатель 12; бадью (или бункер) 11.

Связь сборщика с оборудованием энергообеспечения осуществлена через лебедку 4, на которую намотан кабель-шланг 2 для питания сборщика электрогидроэнергией. Связь оборудования энергообеспечения с кораблем осуществлена через высоковольтный кабель-трос 7. Опускание и подъем бадьи осуществляется приспособлением для захвата 10. Приспособление имеет подруливающие устройства 9, которые осуществляют точное позиционирование ее при опускании/подъеме.

Поднятое полезное ископаемое перегружается из бадьи в корабельный бункер, предварительно обогащается путем отделения жидкой части собранного материала и осушения. Дальнейшее транспортирование возможно с использованием дополнительного судна-баржи, на которое перегружается осушенное полезное ископаемое, или самим кораблем обеспечения 8.

Позиционирование и ориентация всех агрегатов и устройств происходит с помощью приемопередатчиков 1, расставленных с определенным шагом, образуя координатную «сетку». Все сигналы с приемопередатчиков проходят через центральный блок управления, находящийся на корабле обеспечения, который подает ответные сигналы управления на приемопередатчики, а они пересылают сигналы на узлы и агрегаты, участвующие в сборе полезных ископаемых.

Возможно применение других транспортных систем: с использованием шнекового питателя 14 и бадьи закрытого типа 15, соединенной с трубопроводом гидротранспортной системы (рис.6, *б*); подъем с помощью управляемой движителями 17 бадьи 7 на тросе 16 (рис.6, *в*); с использованием


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.14

*Записки Горного института.* 2022. Т. 253. С. 82-96
© С.М.Сударикov, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022

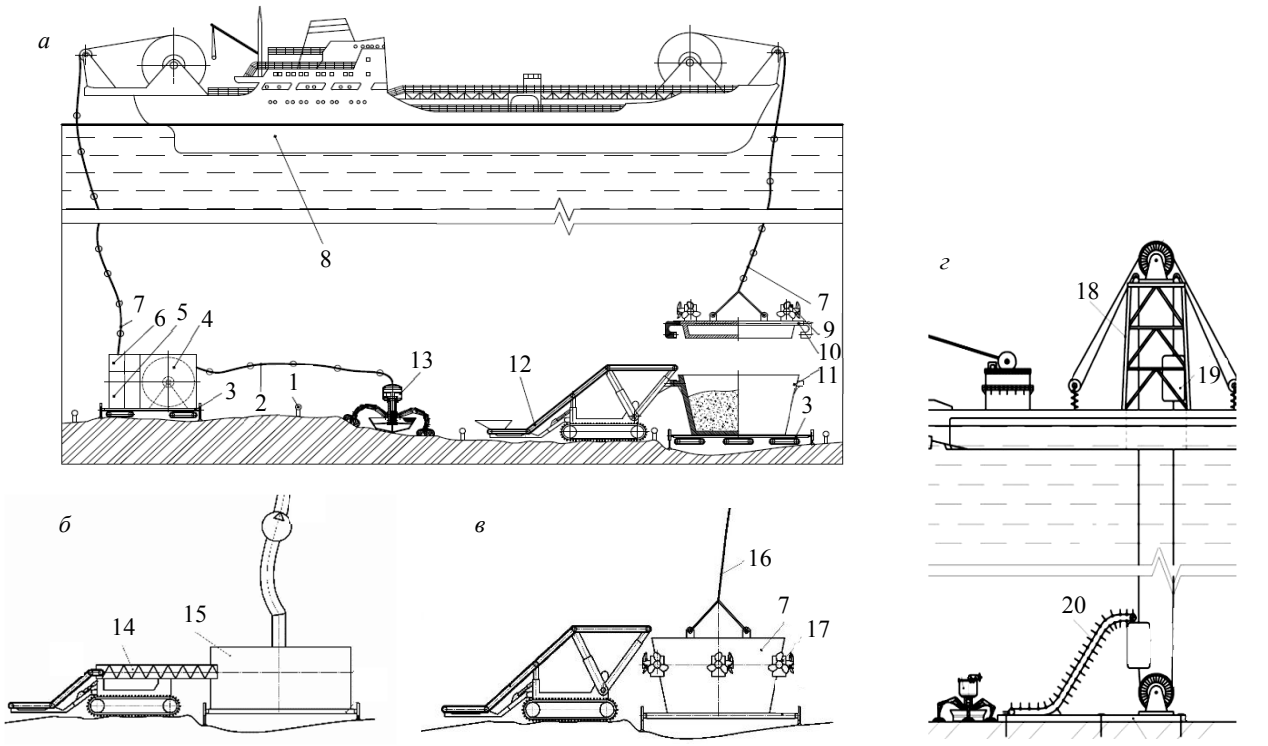



Рис.6. Концепция сбора КМК и ЖМК со сборщиком шагающего типа, предложенная СПГУ (*а*); варианты гидротранспортной системы (*б*), бадьевого подъема (*в*) и скипового подъема (*г*)

скипового подъема, при котором скипы 19 загружаются скребковым конвейером 20, поднимаются на судно обеспечения и разгружаются в копре 18 (рис.6, *г*). Использование последней системы возможно для спокойных (без волнений) вод или с применением специальных устройств компенсации качек.

При оценке производительности комплекса ключевым фактором являются параметры и тип самого сборщика, от которого будет зависеть производительность сбора.

Расчетную часовую производительность одного сборщика следует вычислять по формуле [41]

$$Q_{\text{расч}} = \frac{\rho E}{(T_{\text{сб}} + T_{\text{загр}})n + T_{\text{дв}} + T_{\text{разгр}} + T_{\text{пер}}},$$

где ρ – плотность полезного ископаемого; $E$ – объем промежуточного бункера; $T_{\text{сб}}$ – время сбора одного исполнительного органа; $T_{\text{загр}}$ – время загрузки в бункер одного ковша; $n$ – количество загружаемых исполнительных органов, требуемое для наполнения бункера; $T_{\text{дв}}$ – время передвижения к узлу перегрузки; $T_{\text{разгр}}$ – время выгрузки бункера на перегружатель; $T_{\text{пер}}$ – время передвижения на прежнее или новое место сбора.

Вычисление показателей $T_{\text{загр}}$, $T_{\text{дв}}$, $T_{\text{разгр}}$ и $T_{\text{пер}}$ заключается в расчете параметров, связанных со временем работы гидроцилиндров манипуляторов. Каждая операция может быть рассчитана как совокупность работающих одновременно или последовательно гидроцилиндров только после выбора необходимого типа гидроцилиндра для каждой операции. Порядок и степень выдвижения штоков гидроцилиндров рассчитывается по составленной планограмме действий сборщика. Для значения временных показателей $T_{\text{сб}}$ требуется знать физико-механические свойства полезного ископаемого и усилия на исполнительном органе. Выбор габаритов исполнительного органа будет также зависеть от свойств залегания месторождений (от их средней мощности).

Количество требуемых для заполнения бункера операций сбора $n$ зависят от объема бункера и количества сборщиков. Данная задача в основном решается на этапе обоснования системы разработки месторождения, которая должна обеспечить максимальную непрерывность работы транспортной системы.



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.М.Сударикова, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022

Основываясь на данных геологов, для обеспечения рентабельности требуется добыча 1 млн т/год полезного ископаемого, что соответствует 150-250 т/ч.

**Обсуждение.** С целью проверки возможности использования исполнительного органа грейферного типа для сбора КМК с минимизацией воздействия на окружающую среду проведены экспериментальные исследования, определяющие основные закономерности процесса разрушения КМК резанием (внедрение грейферного ковша) и ударными импульсами (отделение КМК от подложки). Поскольку однозначных данных о физико-механических характеристиках КМК нет, а их строение и параметры на глубинах могут варьироваться, то перед тем, как проводить экспериментальные испытания породоразрушающим инструментом на разработанных стендах, необходимо уточнить физико-механические характеристики имеющихся образцов. Для этого использовался расчетный метод по параметрам, экспериментально полученным в результате нагружения образцов сферическими инденторами [45], с построением паспорта прочности КМК в трех состояниях: воздушно-сухом, имеющемся (влажность 20 %), водонасыщенном (табл.3).

*Таблица 3*

**Исследование физико-механических свойств образцов КМК сферическими инденторами**

| Измеряемые параметры | Состояние КМК | | |
|---|---|---|---|
| | Воздушно-сухое | Нормальные условия (влажность 20 %) | Водонасыщенное |
| Предел прочности при растяжении $\sigma_р$, МПа | 0,82 | 0,86 | 0,78 |
| Предел прочности при сжатии $\sigma_с$, МПа | 5,4 | 5,87 | 5,83 |
| Предел прочности при срезе (сцепление) $C_0$, МПа | 1,35 | 1,45 | 1,02 |
| Коэффициент хрупкости $K_{хр}$ | 6,5 | 6,7 | 7,45 |
| Максимальное сопротивление срезу $\tau_{max}$, МПа | 8,6 | 9,42 | 10,14 |

Паспорт прочности породы (рис.7, *а*) представляет собой графики для каждого состояния образцов КМК, состоящие из соединенных между собой касательных к кругам Мора, радиусы которых определяются предельными значениями напряжений для различных видов разрушения.

Экспериментальные исследования по разрушению КМК резанием проводились на испытательной машине Zwick/Roell Z100 эталонным резцом, по результатам которых построены графики зависимости усилия резания от деформации сжатия КМК (рис.7, *б*) при изменении толщины стружки 10-30 мм. Из-за высокой пористости и хрупкости образцов КМК повторяющихся серий сколов достичь не удалось, исключение составила серия опытов при срезании стружки 20 мм, которая сопровождалась несколькими элементарными сколами, что характерно для процесса резания.

Экспериментальные исследования по разрушению КМК ударом проводились на лабораторном маятниковом копре с использованием ударной пики, которая отводилась на различный угол и совершала удар с разной энергией по образцам вдоль или поперек слоев напластования КМК. В каждой серии ударов фиксировалось значение глубины внедрения ударной пики в образцы. В результате построены графики зависимостей глубины внедрения от энергии удара (рис.7, *в*).

**Заключение.** Видовой состав и разнообразие придонных сообществ организмов на дне Мирового океана в районах предполагаемой добычи ЖМК, КМК и ГПС отличаются характерными чертами наблюдаемых экосистем.

Для РРР-ЖМК на глубоководном поле Кларион-Клиппертон характерны отсутствие крупных скоплений морских организмов и благоприятная для сбора конкреций с поверхности дна морфология рудных залежей.

На подводных Магеллановых горах КМК формируются на верхних участках склонов гайотов. Таким образом, операции по отделению КМК от коренных пород не могут нанести серьезный ущерб придонной фауне. Однако сопутствующие эффекты, связанные с образованием шлейфов осадочного материала и замутнением значительных объемов воды, в результате этих операций могут отрицательно влиять на жизнедеятельность морской биоты.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

DOI: 10.31897/PMI.2022.14


© С.М.Судариков, Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, В.А.Петров, 2022

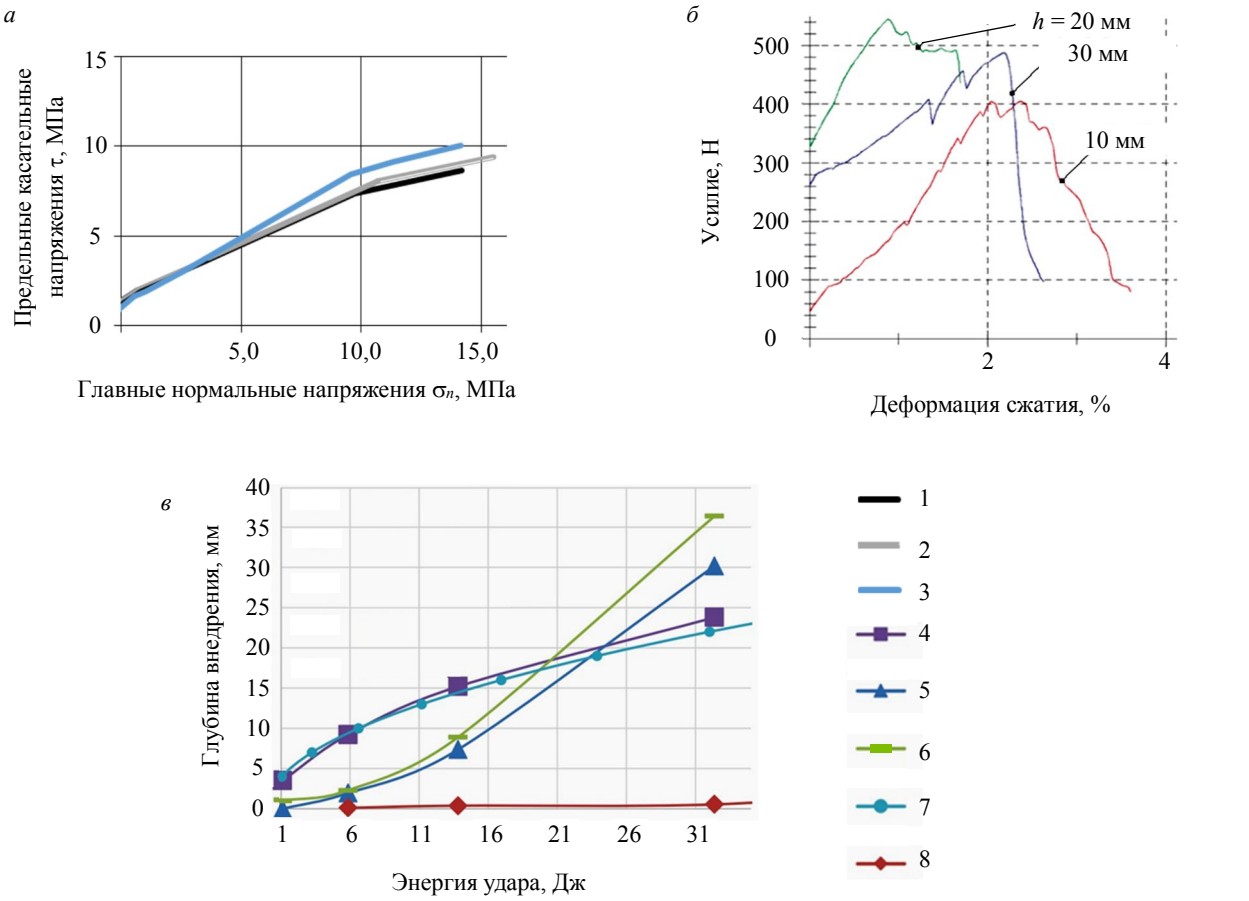



Рис.7. Экспериментальные исследования разрушения КМК: сферическими инденторами (*а*); резанием на испытательной машине Zwick/Roell Z100 (*б*); ударом на маятниковом копре (*в*)

1 – воздушно-сухие КМК; 2 – нормальные условия (влажность 20 %); 3 – водонасыщенные КМК; 4 – удар поперек слоя КМК; 5 – удар вдоль слоя КМК; 6 – удар вдоль слоя (соединение с подложкой); 7 – теоретическая зависимость; 8 – удар в подложку

В пределах РРР-ГПС (САХ) выделено три типа гидротермальных систем, отличающихся по гидротермальной активности, количеству, плотности и видовому разнообразию морских организмов.

1. Поля с ограниченным развитием современной высокотемпературной гидротермальной деятельности и слабым распространением (Ашадзе-1) или отсутствием (Ашадзе-2) гидротермальной фауны. Поля этого типа составляют большинство среди изученных объектов гидротермального оруденения в пределах РРР-ГПС. При освоении ресурсов таких объектов необходимо использовать технику, максимально обеспечивающую сохранность гидротермальной фауны, и ограничить работы в зоне влияния высокотемпературных гидротермальных источников. Наряду с повышенной концентрацией живых организмов вокруг источников следует опасаться отрицательного воздействия на добычную технику высокотемпературных кислых растворов.

2. Активные гидротермальные поля с обильной и уникальной фауной (типа поля Логачев) отличаются высокой температурой и агрессивным характером кислых флюидов «черных курильщиков». Анализ условий залегания ГПС и особенностей видового состава и разнообразия гидротермальных сообществ живых организмов позволяет выделить типичные гидротермальные поля РРР на САХ. Наибольшие сложности для работы механизмов в процессе добычи минеральных ресурсов возникают при наличии на участках повышенной и средней гидротермальной активности (типа поля Логачев, Ашадзе-1). Добыча руды в этих условиях невозможна без нанесения серьезного вреда колониям гидротермальных сообществ живых организмов вблизи глубоководных гидротермальных систем океана. В то же время на полях малой и средней активности (типа Ашадзе-1, -2) возможен выбор неактивных, доступных для разработки участков.



Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. Отсутствие высокотемпературной разгрузки рудообразующих растворов и гидротермальной фауны на неактивных гидротермальных полях (типа Краснов, большая часть Ашадзе-2) наиболее благоприятно для освоения минеральных ресурсов с использованием разрабатываемых технических средств.

При разработке рассмотренных видов ТПИ необходимо учитывать, что определенное количество придонных организмов (особенно микробиоты) всегда присутствует и в относительно «пустынных» районах океанского дна. Поэтому очень важно при выборе технологии и средств механизации процессов добычи выбирать конкретные исполнительные органы механизмов, которые бы минимально механически воздействовали как на поверхность дна, так и на подстилающие породы и придонные воды. Стоит отметить, что контрастные различия условий залегания и состава придонных экосистем не позволяют создать универсальное добычное устройство, способное сохранить глубоководных обитателей всех перечисленных типов ТПИ.

Анализ возможностей разрабатываемых устройств показывает, что приоритет по экологическим параметрам (замутнение, механическое воздействие на дно) выводит на высокие места устройства с камерами разряжения и механизмом шагания на рукоятях. Для КМК, залегающих в особо сложных условиях, выделяется технология СПГУ (как наиболее эффективная), отличающаяся наличием сборщиков на рукоятях со встроенными грейферами и ударниками. Для создания работоспособной конструкции по сбору глубоководных ЖМК или КМК со значительным разбросом среднего размера конкреций (50-250 мм) или кусков отколотых КМК (при наличии обильных уникальных форм флоры и фауны) предлагается использовать концепцию СПГУ. Она представлена в виде конкретного примера конструкции глубоководного придонного сборщика с улучшенными экологическими показателями. Правильное применение этой концепции при отладке шагания и выборе рациональных параметров конструкции как самого сборщика, так и исполнительного органа, позволит достичь минимального механического воздействия на донные области.

Для эффективного сбора глубоководных КМК предложены и запатентованы: концепция сбора ЖМК и КМК; шагающий сборщик КМК и грейферный исполнительный орган со встроенным скалывающим элементом – ударником. Проведенные экспериментальные исследования образцов КМК на предмет эффективности сбора грейферным исполнительным органом со встроенным ударником показали возможность:

• транспонирования полученных значений физико-механических свойств имеющихся образцов КМК на массив полезного ископаемого в реальных горно-геологических условиях;

• внедряться в верхние (менее прочные) слои КМК грейферным ковшом с осевым усилием 300-600 Н;

• интенсифицировать внедрение в средние слои КМК и откол кусков полезного ископаемого от подложки с помощью встроенных ударников в челюстях грейфера с параметром энергии удара до 30 Дж;

*Авторы выражают благодарность заместителю главного геолога АО «Южморгеология» И.Н.Понамаревой за предоставление образцов кобальт-марганцевых корок для проведения экспериментальных исследований.*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Сударикова С.М., Змиевский М.В.* Геохимия рудообразующих гидротермальных флюидов Мирового океана // Записки Горного института. 2015. Т. 215. С. 5-15.

2. *Сударикова С.М.* Моделирование геохимических процессов в зоне субмаринной разгрузки гидротермальных растворов // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 284-291. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.284

3. *Van Dover C.L., Smith C.R., Ardron J. et al*. Environmental management of deep-sea chemosynthetic ecosystems: justification of and considerations for a spatially-based approach // ISA Technical study International Seabed Authority. Kingston: International Seabed Authority, 2011. N 9. 90 p.

4. *Юнгмейстер Д.А., Сударикова С.М., Киреев К.А*. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 88-95. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88

5. *Юнгмейстер Д.А., Смирнов Д.В., Вержанский А.П., Исаев А.И.* Машины и оборудование для добычи железомарганцевых конкреций. СПб: Политехника-сервис, 2015. 135 с.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

6. *Serzhan S.L.* Determining the rational immersion depth of a mining complex capsule for underwater mining of ferromanganese nodules // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 924-929. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.063

7. *Мельников М.Е., Плетнев С.П.* Возраст и условия формирования кобальтоносных марганцевых корок на гайотах Магеллановых гор // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 1. С. 3. DOI: 10.7868/S0024497X12050059

8. *Liu C., Massey M.S., Latta D.E. et al.* Fe(II)-induced transformation of iron minerals in soil ferromanganese nodules // Chemical geology. 2021. Vol. 559. P. 119901. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2020.119901

9. *Shulga N.A.* Characteristics of Alkanes in Ferromanganese Nodules of the Clarion-Clipperton Fracture Zone // Oceanology. 2018. Vol. 58. Iss. 5. P. 672-678.

10. *Каменская О.Е., Мельник В.Ф., Гудей А.Дж.* Гигантские простейшие (ксенофиофории и комокиации) с поля железомарганцевых конкреций Кларион-Клиппертон (восточная часть Тихого океана) // Журнал общей биологии. 2012. Т. 73. С. 377-388.

11. *Durden J.M., Bett B.J., Ruhl H.A.* The hemisessile lifestyle and feeding strategies of Iosactis vagabunda (Actiniaria, Iosactiidae), a dominant megafaunal species of the Porcupine Abyssal Plain // Deep-Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 102. P. 72-77. DOI: 10.1016/j.dsr.2015.04.010

12. *Ramirez Llodra E., Billett D.S.M.* Deep-sea ecosystems: pristine biodiversity reservoir and technological challenges // The Exploration of marine biodiversity: scientific and technological challenges. Bilbao, Spain: Fundacion BBVA, 2006. P. 63-92.

13. *Gollner S., Kaiser S., Menzel L. et al.* Resilience of benthic deep-sea fauna to mining activities // Marine Environmental Research. 2017. Vol. 129. P. 76-101. DOI: 10.1016/j.marenvres.2017.04.010

14. *Miljutin D., Miljutina M., Arbizu P., Galéron J.* Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (ClarionClipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific) // Deep-Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers. 2011. Vol. 58. Iss. 8. P. 885-897. DOI: 10.1016/j.dsr.2011.06.003

15. *Hein J.R., Koschinsky A.* Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules // Treatise on Geochemistry (Second Edition). Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2014. P. 273-291. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.09879-X

16. *Мельников М.Е.* Кобальтоносные марганцевые корки подводных гор океана. Современное состояние проблемы // VII Всероссийское литологическое совещание «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории», 28-31 октября 2013, Новосибирск, Россия; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука, 2013. Т. 2. С. 264-268.

17. *Garrigue C., Geyer Y., Kennedy A.S., Zerbeni A.N.* Satellite tracking reveals novel migratory patterns and the importance of seamounts for endangered South Pacific humpback whales // Royal Society Open Science. 2015. Vol. 2. Iss. 11. № 150489. DOI: 10.1098/rsos.150489

18. *Watling L., Auster P.* Seamounts on the High Seas Should Be Managed as Vulnerable Marine Ecosystems // Frontiers in Marine Science. 2017. Vol. 14. P. 14. DOI: 10.3389/fmars.2017.0001

19. *Anantharaman K., Dreier J.A., Dick G.J.* Metagenomic resolution of microbial functions in deep-sea hydrothermal plumes across the Eastern Lau Spreading Center // The ISME Journal. 2016. Vol. 10. P. 225-239. DOI: 10.1038/ismej.2015.81

20. *Petersen J.M., Zielinski F.U., Pape T. et al.* Hydrogen is an energy source for hydrothermal vent symbioses // Nature. 2011. Vol. 476. P. 176-180. DOI: 10.1038/nature10325

21. *Rivers A.R., Sharma S., Tringe S.G. et al.* Transcriptional response of bathypelagic marine bacterioplankton to the Deepwater Horizon oil spill // The ISME Journal. 2013. Vol. 7. P. 2315-2329. DOI: 10.1038/ismej.2013.129

22. *Baker E.T.* Hydrothermal plumes // Encyclopedia of Marine Geosciences. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, 2016. 994 p. DOI: 10.1007/978-94-007-6238-1_16

23. *Baker E.T., Resing J.A., Haymon R.M. 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. DOI: 10.1016/j.epsl.2016.05.031

24. *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. DOI: 10.1016/j.dsr2.2015.05.001

25. *Boschen R.E., Rowden A.A., Clark M.R. et al.* Megabenthic assemblage structure on three New Zealand seamounts: implications for seafloor massive sulfide mining // Marine ecology progress series. 2015. Vol. 523. P. 1-14. DOI: 10.3354/meps11239

26. *Fouquet Y., Cherkashov G., Charlou J.L. et al.* Serpentine cruise – ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid-Atlantic Ridge: First submersible studies on Ashadze 1 and 2, Logatchev 2 and Krasnov vent fields // InterRidge News. 2008. Vol. 17. P. 15-19.

27. *Charlou J.-L., Donval J.-P., Konn C. et al.* High hydrogen and abiotic hydrocarbons from new ultramafic hydrothermal sites between 12° N and 15° N on the Mid-Atlantic Ridge. Results of the Serpentine cruise (March 2007) // Geophysical Monograph Series. 2007. Vol. 188. P. 265-296. DOI: 10.1029/2008GM000752

28. *Fabri M-C., Bargain A., Briand P. et al.* The hydrothermal vent community of a new deep-sea field, Ashadze-1, 12°58′ N on the Mid-Atlantic Ridge // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 2010. Vol. 91. Iss. 1. P. 1-13. DOI: 10.1017/S0025315410000731

29. *Fouquet Y., Cherkashov G., Charlou J. et al.* Diversity of ultramafic hosted hydrothermal deposits on the mid Atlantic ridge: first submersible studies on Ashadze, Logatchev 2 and Krasnov Vent Fields during the Serpentine Cruise // AGU Fall Meeting Abstracts. 2007. Vol. 2007. № T51F-03.

30. *Sudarikov S.M., Roumiantsev A.B.* Structure of hydrothermal plumes at the Logatchev vent field, 14°45′N, Mid-Atlantic Ridge: evidence from geochemical and geophysical data // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. Vol. 101. P. 245-252. DOI: 10.1016/S0377-0273(00)00174-8

31. *Petersen S., Kuhn K., Kuhn T. et al.* The geological setting of the ultramafic-hosted Logatchev hydrothermal field (14°45′ N, Mid-Atlantic Ridge) and its influence on massive sulfide formation // Lithos. 2009. Vol. 112. P. 40-56. DOI: 10.1016/j.lithos.2009.02.008



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

32. *Самарина Т.Е.* Особенности геохимии гидротермальной экосистемы «Ирина-2» // Записки Горного института. 2006. Т. 167 (2). С. 46-48.

33. *Cherkashov G., Poroshina I., Stepanova T. et al*. Seafloor massive sulfides from the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge: new discoveries and perspectives // Marine Georesources & Geotechnology. 2010. Vol. 28. Iss. 3. P. 222-239. DOI: 10.1080/1064119X.2010.483308

34. *Lipton I., Gleeson E., Munro P.* Preliminary Economic Assessment of the Solwara Project, Bismark Sea // Technical report compiled under NI 43-101. Toronto, Canada: PNG – Nautilus Minerals Niugini, 2018. 242 p.

35. *Ishiguro S., Yamauchi Y., Odaka H., Akiyama S.* Development of Mining Element Engineering Test Machine for Operating in Seafloor Hydrothermal Deposits // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2013. Vol. 50. № 2. P. 21-26.

36. *Ishiguro S., Masuda M., Komatsu M. et al.* Development of the Pilot System for Test of Excavating and Ore lifting of Seafloor Polymetallic Sulfides // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2018. Vol. 55. № 3. P. 1-7.

37. *Sharma R.* Deep-Sea Mining: Current status and future considerations // Deep-Sea Mining. Resource potential, technical and environmental considerations. 2017. P. 3-21. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_1

38. *Tetsuo Y.* Fundamental geotechnical consideration for design of deep-sea mining systems // Deep-Sea Mining. Resource potential, technical and environmental considerations. 2017. P. 259-295. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_9

39. Atmanand M.A., Ramadass G.A. Concepts of deep-sea mining technologies // Deep-Sea Mining. Resource potential, technical and environmental considerations. 2017. P. 295-341. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_10

40. *Сержан С.Л., Медведков В.И.* Влияние глубины погружения капсулы с пульпоперекачным оборудованием на эффективность добычи полезного ископаемого морским добычным комплексом // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 3. С. 34-42.

41. *Iungmeister D.A., Korolev R.I., Serzhan S.L. et al.* Materials of devices and equipment for deep-sea mining of manganese resources // High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing (HIRM-2020) 28 February 2020, Siberia, Russia. Journal of Physics: Conference Series, 2020. Vol. 1582. № 012098. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012098

42. Патент RU 186415 U1. Придонное добычное устройство для сбора железомарганцевых конкреций со дна морей / Д.А.Юнгмейстер, А.П.Исаев, С.Л.Сержан. Опубл. 21.01.2019. Бюл. № 4.

43. Патент RU 193043 U1. Устройство для сбора железомарганцевых конкреций со дна морей / Д.А.Юнгмейстер, А.П.Исаев, С.Л.Сержан и др. Опубл. 11.10.2019. Бюл. № 29.

44. Патент RU 203596 U1. Устройство для сбора кобальтомарганцевых корок со дна морей / Д.А.Юнгмейстер, Р.И.Королев, С.Л.Сержан, Р.Ю.Уразбахтин. Опубл. 13.04.2021. Бюл. № 11.

45. *Korshunov V.A., Solomoychenko D.A., Bazhukov A.A.* Strength estimation of fractured rock using compression – a specimen with spherical indenters // ISRM European Rock Mechanics Symposium – EUROCK 2018, 22-26 May 2018, St. Petersburg, Russia. OnePetro, 2018. № ISRM-EUROCK-2018-034.

***Авторы*: С.М.Сударикov,** *д-р геол.-минерал. наук*, *профессор*, *https://orcid.org/0000-0002-3692-5692* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Д.А.Юнгмейстер,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *https://orcid.org/0000-0001-7858-8340* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **Р.И.Королев,** *аспирант*, *S185052@stud.spmi.ru*, *https://orcid.org/0000-0001-5247-9453* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **В.А.Петров,** *аспирант*, *https://orcid.org/0000-0003-3962-7348* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*