

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДЪЕМА ДЛЯ КОМПЛЕКСОВ ДОБЫЧИ ГЛУБОКОВОДНЫХ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

С.Л. Сержан¹, Д.В. Малеванный¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Serzhan_SL@pers.spmi.ru

Аннотация: Рассмотрена проблематика формирования добычного комплекса при глубоководной разработке уникальных твердых полезных ископаемых. Проанализированы горно-геологические условия месторождений, минеральный состав полезных ископаемых, выполнен экономический анализ стоимости одной тонны сухой массы железомарганцевых конкреций, кобальтоносных марганцевых корок и глубоководных полиметаллических сульфидов. Выполнен обзор международных проектов по добыче уникальных твердых полезных ископаемых, анализ предлагаемых способов разработки, а также представлен типовой добычной комплекс, на основе анализа. Среди рассматриваемых вариантов были выведены общие тенденции в формировании добычной машины, а также описаны испытания прототипов перспективных проектов, таких как Mine-Ro (Южная Корея), Apollo-II (Голландия), Patania II (Бельгия) и др. Проанализированы варианты формирования вспомогательного судна, выполняемые им вспомогательные операции, а также способы размещения оборудования для обслуживания и диспетчеризации машин. Также было отмечено, что основной проблемой комплекса является отсутствие эффективного способа подъема. В этой связи был выполнен анализ рациональных способов подъема. Среди рассматриваемых вариантов выделены циклический, поточный, эрлифт, двухстадийный подъем и циклично-поточный способ. Определены энергозатраты и производительность каждого варианта, представлен график зависимости удельной производительности от глубины разработки. Выполнен анализ циклично-поточного способа подъема твердых полезных ископаемых, оценка производительности и ограничивающих факторов.

Ключевые слова: глубоководная добыча, добычной комплекс, энергоэффективность, конкреции, корки, международный орган по морскому дну, технологии подъема, минерально-сырьевые ресурсы.

Для цитирования: Сержан С. Л., Малеванный Д. В. Современное состояние и перспективы развития технологий подъема для комплексов добычи глубоководных твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12-1. – С. 107–128. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_107.

Lifting technologies for deep-sea solid mineral extraction facilities: Current situation and prospects

S.L. Serzhan¹, D.V. Malevannyi¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Serzhan_SL@pers.spmi.ru

Abstract: This review article is devoted to the problems of formation of the mining complex at deep-water development of unique solid minerals. The mining and geological conditions of deposits, mineral composition of minerals, economic analysis of the cost of one ton of dry mass of ferromanganese nodules, cobalt-bearing manganese crusts and deep-sea polymetallic sulfides is analyzed. A review of international mining projects for unique solid minerals, an analysis of proposed mining methods, and a typical mining complex based on the analysis were performed. Among the considered variants, the general trends in the formation of the mining machine have been deduced, and the tests of prototypes of promising projects such as Mine-Ro (South Korea), Apollo-II (Netherlands), Patania II (Belgium), etc. have been considered. The variants of auxiliary vessel formation, auxiliary operations performed by it, as well as methods of equipment placement for maintenance and dispatching of machines were considered. It was also noted that the main problem of the complex is the lack of an effective lifting method. In this regard, an analysis of rational methods of lifting was performed. Among the considered variants cyclic, in-line, erlift, two-stage lifting and cyclic-in-line method were singled out. Energy consumption and productivity of each variant are determined, the graph of dependence of specific productivity on mining depth is presented. The cyclic-flow method of solid minerals lifting is analyzed, productivity and limiting factors are estimated.

Key words: deep sea mining, mining complex, energy efficiency, nodules, crusts, international seabed authority, lifting technologies, mineral resources.

For citation: Serzhan S. L., Malevannyj D. V. Lifting technologies for deep-sea solid mineral extraction facilities: Current situation and prospects. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024; (12-1):107-128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_107.

Введение

На протяжении последних десятилетий многими странами поднимался вопрос о возможности разработки месторождений твердых полезных ископаемых (ТПИ), скрытых толщей воды. Но в связи с отсутствием проверенных технологий, легких и прочных материалов, способных выдерживать огромное давление, успехов достичь не удалось. Попытки создать промышленный комплекс дальше опытных тестов не продвигались, причем не только в СССР, но и в других странах мира.

Спустя время многое изменилось, открылась возможность добывать минеральное сырье не только в шельфовой зоне, но и на глубоководном горизонте. Появились новые сплавы и полимеры, имеющие необходимые качества для работы в морской среде, а также множест-

во технологий, которые ученые не переставали разрабатывать и осваивать.

Добыча полезных ископаемых в общем смысле — это комплекс определенных эффективных научных решений, экономических знаний и практического опыта для разработки месторождения в конкретных условиях. Только при наличии всех составляющих возможно создать рациональный и производительный добычный комплекс. Рассматривая развитие рудников, разрезов, карьеров, можно увидеть, как научные открытия и полученный опыт меняли представление человека об эффективной технологии разработки. Ключевым моментом стала научно-техническая революция, позволившая перейти от ручного труда к машинному около двухсот лет назад, тем самым ознаменовав стремительный рост технологий и прогресса. А за последние

50 лет горное дело переросло в масштабный минерально-сырьевой комплекс, обеспечивающий мир 70% всего мирового сырья.

Исследования способов автоматизации привели к созданию систем удаленного управления комплексами механизации, тем самым позволив добывать полезные ископаемые с шельфовых месторождений без прямого участия человека.

Несмотря на то, что такие технологии обеспечивают высокую точность производственных процессов, ввиду возникающих непредвиденных обстоятельств полное отсутствие человека пока что невозможно. Однако сам факт разработки морских месторождений позволяет получить необходимый опыт для перехода к следующему этапу горного дела — добыче уникальных глубоководных твердых полезных ископаемых.

Уникальные твердые полезные ископаемые

На первичном этапе среди рентабельных глубоководных твердых полезных ископаемых выделяют три основных типа: железомарганцевые конкреции (ЖМК), кобальтоносные марганцевые корки (КМК), глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС). Уникальные твердые полезные ископаемые морского дна залегают преимущественно во всех водах Мирового океана [1]. Глубина залегания колеблется от 40 до 6000 м,

однако существует определенная корреляция между глубиной и ценностью полезных ископаемых. Так, к примеру, ЖМК, залегающие в Финском заливе на глубине до 40 м, — легко собираемые, однако ценности они не представляют ввиду низкого содержания полезных компонентов. В то же время конкреции, залегающие в Российском разведочном районе (РРР) на глубине около 4900 м в провинции Кларион-Клиппертон, Тихий океан, оцениваются примерно в 1562 долл. за 1 т сухой массы [2].

Горно-геологические условия именно глубоководных ТПИ варьируются от ровных плащеобразных залежей до переменчивых концентрационных образований с резкими впадинами и трещинами (табл. 1). Наибольшей распространенностью пользуются лентовидные рудные залежи протяженностью от 40 до 80 км и шириной от 1 до 5 км со средними весовыми концентрациями от 22 до 30 кг/м² (рис. 1). Температура окружающей среды также сильно варьируется — от 3 до 400 °С, вследствие большой глубины и наличия глубоководных термальных источников. Принимая во внимание наличие возмущений среды, таких как подводные течения, галоклины, волны, разработка подобного рода месторождений представляется весьма сложной задачей [2–4].

Минеральный состав ТПИ многообразен, представлен многими стратегически важными элементами, а также груп-

Таблица 1

Основные горно-геологические условия залегания уникальных глубоководных месторождений [составлено авторами]

Some mining and geological conditions of unique deep-water deposits [Compiled by the authors]

ТПИ	Плотность залегания, кг/м ²	Диапазон глубин залегания, м	Оцененные запасы, млн т	Площадь РРР, км ²
ЖМК	20 – 33	4700 – 5400	551	75 000
КМК	22 – 28	1200 – 3000	270	3000
ГПС	28 – 44	3500 – 4000	147	2500

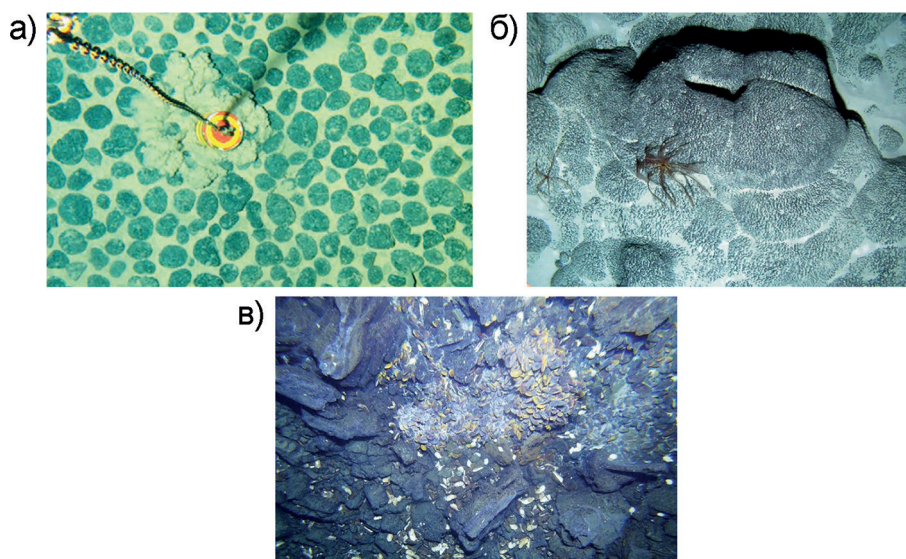


Рис. 1. Типовые виды месторождений глубоководных твердых полезных ископаемых: ЖМК (а); КМК (б); ГПС (в) [2]

Fig. 1. Typical types of deep-sea solid mineral deposits: FMN (a); CMC (b); DPS (v) [2]

пой редкоземельных металлов (табл. 2). Современные технологии переработки позволяют извлечь до 90% полезных компонентов, с минимальными объемами хвостов, тем самым позволяя извлекать максимальную выгоду из сырья. Для расчета средней стоимости 1 т ТПИ каждый содержащийся элемент, приведенный в табл. 2, переводился в доллары, на основании рыночной стоимости одной тонны этого элемента с учетом коэффициента извлечения 0,9. Таким образом, на момент начала 2024 г. мине-

ральный состав ЖМК оценивался около 1562 долл. за 1 т сухой массы (при пересчете процентного содержания металлов в валюту), КМК — около 996 долл., ГПС — приблизительно 429 долл. Учитывая балансовые запасы месторождений (от 150 до 490 млн т), можно сделать вывод о высокой экономической привлекательности будущих проектов по разработке глубоководных твердых полезных ископаемых, которые с большей долей вероятности окупят все затраты на проведение научно-исследователь-

Таблица 2

Содержание полезных ископаемых в уникальных глубоководных месторождениях [составлено авторами]

Mineral content of unique deepwater deposits [compiled by the authors]

ТПИ	Ni, %	Cu, %	Co, %	Mn, %	Pt, %	Mo, %	Pb, %	Au, г/т	Ag, г/т	Zn, %
ЖМК	0,46—1,42	0,12—1,18	0,20—0,73	20,0—36,05	0,2—1,83	0,04—0,06	—	—	—	—
КМК	0,5	—	0,60	20,0—22,0	0,07—0,14	0,05	—	0,12—0,88	—	—
ГПС	—	2,61	—	—	—	—	0,18	0,68—10,4	36,0—164	7,82

ских и опытно-конструкторских работ [2, 5, 6].

Заключенные с Международным органом по морскому дну (МОМД) соглашения обязывают Российскую Федерацию начать добычу ТПИ в течение ближайших 15 лет. Причем необходимо соблюдать следующие условия в соответствии с Конвенцией: годовая производительность комплекса должна составлять 3,0 млн т в год; срок разработки комплекса от вскрытия до консервации — 20 лет. Известны случаи, когда МОМД продлевал действие договоров, по причине сложности проекта и отсутствия значительного прогресса стран-конкурентов, однако современные достижения международных проектов весьма близки к успешной реализации.

Опыт и достижения международных проектов по добыче глубоководных ТПИ

Под подводной добычей твердых полезных ископаемых понимается разработка месторождений, залегающих на дне и в недрах Земли, покрытых Мировым океаном [7]. Разработка поверхностных месторождений ложа океана, к которым относятся глубоководные ТПИ (ЖМК, КМК и ГПС в частности), планируется производить открытым способом через водную толщу.

Особенность глубоководных поверхностных месторождений ТПИ заключается в том, что они залегают непосредственно на морском дне и не перекрыты пустыми породами, что в значительной степени сокращает проведение горных выработок, в том числе для вскрытия выемочных полей.

Таким образом, для осуществления подводной добычи ТПИ не требуются вскрышные работы, горно-подготовительные работы незначительны, а наиболее объемными и трудоемкими являются добычные работы.

Под технологией разработки месторождений понимается совокупность взаимосвязанных процессов, способов и приемов механизированного производства горных работ. При осуществлении подводной добычи можно выделить следующие технологические процессы: подготовку пород к выемке (разрушение массива); выемочно-погрузочные работы; перемещение (подъем) горной массы; складирование (образование отвалов) пустых пород; разгрузка и складирование ПИ; первичное обогащение. При этом, для ЖМК процесс подготовки пород к выемке отсутствует. Также могут существовать варианты, при которых отсутствует процесс первичного обогащения.

Под структурой комплексной механизации подводной добычи ТПИ понимается определенная взаимосвязь и расположение механизмов и устройств, выполняющих технологические процессы добычи. По классификации комплексы оборудования разделяются на звенья соответственно процессам, выполняемым горными и транспортными машинами: звено подготовки пород к выемке, звено выемки и погрузки; подъемно-транспортное звено (непрерывного или циклического действия); звено отвалообразования и складирования; звено первичного обогащения [8].

Типовой глубоководный добычный комплекс в общем виде состоит из следующих элементов: горная машина с инструментом изъятия; подъемно-транспортная система; судно на поверхности воды; система сброса отходов. Судно обеспечивает управление и диспетчеризацию всех элементов комплекса, система сброса необходима для возвращения оборотной воды на дно (отвалообразование пустых пород), инструмент изъятия необходим для отделения ТПИ от морского дна, подъемная система транспортирует ископаемое на судно. Причем при проектировании систем необходимо учи-

тивать проблематику и специфику глубоководных твердых полезных ископаемых, а именно: гидростатическое давление до 500 раз выше атмосферного, полная темнота, экстремальные температуры, недостаток информации об океанических экосистемах и последствиях горнодобывающей деятельности, изменение течений со временем и с увеличением глубины, переменные характеристики морского дна [9 – 11].

Испытания прототипов международных проектов проводятся с 1978 г., каждый раз демонстрируя различные нововведения и идеи. Основные проекты по добыче глубоководных ТПИ представлены в табл. 3. Страны-участники преследуют цель создания высокопроизводительного универсального добычного аппарата, способного вне зависимости от условий поверхности морского дна

свободно перемещаться и осуществлять сбор ТПИ. На протяжении времени проводились многочисленные испытания, что в итоге привело к формированию определенного принципа создания добычной машины [12]. За счет свойств проходимости, маневренности, скорости передвижения наилучшим был признан вариант гусеничного хода. Причем в настоящее время способы передвижения при помощи колес, а также шагающий способ не рассматриваются как конкурентоспособные. Отдельно можно выделить технологии, в которых в качестве добычного аппарата используются телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), например добычной робот компании HYCO Ltd. (рис. 2). Такие машины в большинстве случаев не касаются поверхности морского дна, а осуществляют перемещение за счет



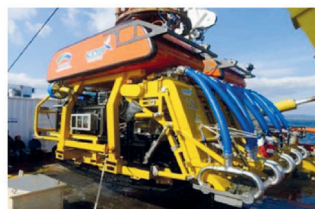
Sagar Kanya, 2000



Sagar Kanya, 2010



Mine Ro-I, 2010



Mine Ro-II, 2012



Apollo-II, 2018



Patania II, 2018



Kunlong 500, 2018



Kunlong 2000, 2018



HYCO Ltd., 2022

Рис. 2. Прототипы добычных аппаратов международных проектов [17]

Fig. 2. Prototypes of mining apparatus from international projects [17]

нулевой плавучести и движущего привода [13, 14].

Среди типовых добычных машин большое количество примеров уже испытанных прототипов (рис. 2). Примером успешного инструмента изъятия можно считать подводную добычную машину Patania II компании Seatools для проекта Global Sea Mineral Resources (GSR) [15 – 17]. Техническими требованиями к проектированию являлись минимизация операционных рисков и нарушений графиков, баланс между прочностью и легкостью. Отдельной задачей стала разработка компенсаторов давления, а также клапанной коробки, которые должны были исправно функционировать при заданных условиях.

Машина выполнена в виде бульдозера на гусеничном ходу, однако рабочий орган заменен на специально разработанный вакуумный захват. Принцип работы заключается в создании зоны пониженного давления внутри патрубков; образованная разница давления окружающей акватории и вакуума в патрубках формируют восходящий поток двухфазной гидросмеси, проходящий через многочисленные сопла и поднимающей ТПИ на многоковшовую цепную решетку, перегружающую полезное ископаемое в отсек хранения.

Проведенные испытания машины подтверждают правильность выбранного решения по проектированию инструмента изъятия, а также демонстрируют

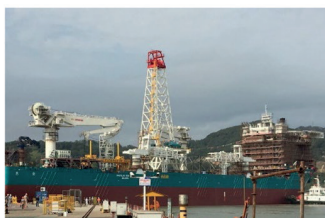
высокие показатели производительности, полноты извлечения и энергоэффективности. В технологии GSR подъем на поверхность осуществляется при помощи группы параллельно работающих насосов, обеспечивая поточный способ транспортирования [17 – 19].

Примером удачного решения при исполнении морского судна можно назвать совместный проект компании Allseas и The Metals Company (TMC) – судно Hidden Gem (рис. 3). Корабль выполнен в классическом виде и способен выполнять определенные важные функции, а именно: диспетчеризация, оснащение и контроль ТНПА; функция первичной переработки, дробления и складирования поднятого ТПИ; обеспечение ремонта и обслуживания подводных добычных модулей. В технологии, применяемой компанией Allseas, используется эрлифтный подъем гидросмеси, сущность которого заключается в разбавлении двухфазного потока в вертикальном трубопроводе пузырьками газа, в результате чего он превращается в трехфазный поток низкой плотности; именно поэтому на судне также располагается необходимое оборудование, в первую очередь компрессорная установка [22, 23]. Проведенные испытания подтвердили исправную работу каждого функционирующего узла, а также смогли продемонстрировать производительность в 86,4 т/ч.

Однако стоит отметить, что все технологии, представленные выше, пред-



Hidden Gem, 2024



Nautilus New Era, 2022



Poseidon I, 2022

Рис. 3. Вспомогательные добычные суда международных проектов [17, 20, 21]

Fig. 3. Supporting production vessels of international projects [17, 20, 21]

Таблица 3

Испытания прототипов международных проектов по добыче глубоководных ТПИ [17]
Testing prototypes of international deep-sea solid minerals projects [17]

Год	Органи- зация	Страна	Место проведения испытаний	Глубина залега- ния, м	ТПИ	Прототип
1978	OMI	Германия, США, Канада, Япония	Тихий океан	5200	ЖМК	SEDCO-445
1978	OMA	США, Бельгия, Италия	Тихий океан	4570	ЖМК	—
1979	OMCO	США, Голландия	Север Тихого океана	5000	ЖМК	Hughes Glo- mar Explorer
1997	TRAM	Япония	Север Тихого океана	2200	ЖМК	—
2000	NIOT	Индия, Германия	Индийский океан	410	ЖМК	Sagar Kanya
2001	COMRA	Китай	Озеро Фусянь	135	ЖМК	—
2006	NIOT	Индия	Индийский океан	541	ЖМК	Sagar Kanya
2010	KORDI	Южная Корея	Восточное Корейское море	100	ЖМК	Mine Ro
2010	NIOT	Индия	Арабское море	512	ЖМК	Sagar Kanya
2013	KIOST	Южная Корея	Восточное Корейское море	1370	ЖМК	Mine Ro-II
2015	KIOST	Южная Корея	Восточное Корейское море	1200	ЖМК	Mine Ro-II
2016	COMRA, CRIMM	Китай	Южно-Китайское море	304	ЖМК	—
2017	GSR	Бельгия	Тихий океан	4571	ЖМК	Patania-I
2017	JOGMEC	Япония	Тихий океан	1600	ГПС	Poseidon-I
2018	Nautilus Minerals	Канада	Новогвинейское море	—	ГПС	—
2018	COMRA, CRIMM	Китай	Южно-Китайское море	514	ЖМК	Kunlong 500
2018	NIOT	Индия	Индийский океан	890	ЖМК	—
2018	IHC Min- ing, Blue Nodules	Голландия, Европейский Союз	Средиземное море	300	ЖМК	Apollo-II
2018	CIMR	Китай	Южно-Китайское море	2019	КМК	Kunlong 2000
2018	IDSEE	Китай	Южно-Китайское море	2490	КМК	—
2019	GSR	Бельгия	Тихий океан	5471	ЖМК	Patania-II
2021	COMRA	Китай	Южно-Китайское море	1306	ЖМК	—
2022	TMC	Канада	Тихий океан	2400	ЖМК	Hidden Gem

Примечание. OMI (Ocean Management Incorporated); OMA (Ocean Mining Associates); OMCO (Ocean Minerals Company); TRAM (Technology Research Association of Manganese Nodules Mining System); COMRA (China Ocean Mineral Resource R&D Association); NIOT (National Institute of Ocean Technology); KORDI (The Republic of Korea Ocean Research and Development Institute); KIOST (The Republic of Korea Institute of Ocean Science and Technology); JOGMEC (Japan Organization for Metals and Energy Security); CRIMM (Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy); CIMR (Changsha Institute of Mining Research); IDSEE (Institute of Deep-sea Science and Engineering); GSR (Global Sea Mineral Resources); TMC (The Metals Company).

лагают энергозатратные способы подъема ТПИ на поверхность [17, 24, 25]. Учитывая отдаленность от крупных источников энергии, а также необходимые требования Конвенции МОМД, необходимо найти баланс между производительностью и энергозатратами, создавая энергоэффективный способ подъема.

Способы подъема твердого полезного ископаемого на поверхность

Анализируя тенденции и направления добычных комплексов, можно заметить, что большинство проектов направлено на добычу таких уникальных твердых полезных ископаемых, как ЖМК. Это обосновано их высокой стоимостью, важным и привлекательным минеральным составом, а также относительно несложными горно-геологическими условиями по сравнению с КМК и ГПС [26–28]. В этой связи в дальнейшем речь пойдет о способах добычи и подъема непосредственно железомарганцевых конкреций.

Рассматривая исключительно процесс подъема горной массы, являющегося наиболее энергоемким и трудоемким, можно выделить две основных технологии: циклическую и поточную [29, 30]. Причем в случае циклической технологии процесс подъема будет совмещен с процессом выемки, что будет снижать производительность, однако преимуществом будет простота используемого оборудования. Современные тенденции в горном деле, а также требования по производительности комплексов приводят к необходимости использования поточных технологий. Наиболее перспективной и эффективной будет гидротранспортная система, которая может быть представлена эрлифтной или насосной системой гидроподъема.

Также существуют теоретические разработки комплексов, в систему подъема которых входит промежуточная капсула

с атмосферным давлением (см. рис. 4) [30–32].

В общем виде добычный комплекс, независимо от системы подъема, состоит из морского судна 1, подводной горной машины с инструментом изъятия 2 и трубопровода положительной плавучести 3 (см. рис. 4).

Эрлифтная система подъема включает в себя вертикальный трубопровод 9, компрессорную установку 10, размещенную на морском судне, воздухопровод 11 и коллектор 12. Воздух под давлением, генерируемый компрессорной установкой 10, подается по воздухопроводу 11 в трубопровод положительной плавучести 3, причем подключение воздухопровода к трубопроводу осуществляется на некотором расстоянии от коллектора 12. Таким образом, в коллекторе образуется трехфазная гидросмесь, состоящая из воды, воздуха и твердого вещества, которая перемещается на поверхность за счет разницы плотностей верхнего и нижнего слоев жидкости. Несмотря на то что технология является частным случаем поточного способа, потенциал такой системы весьма высок. Недостатком такой системы является крайне низкий коэффициент полезного действия (около 25–30%) и, как следствие, низкая энергетическая эффективность [33].

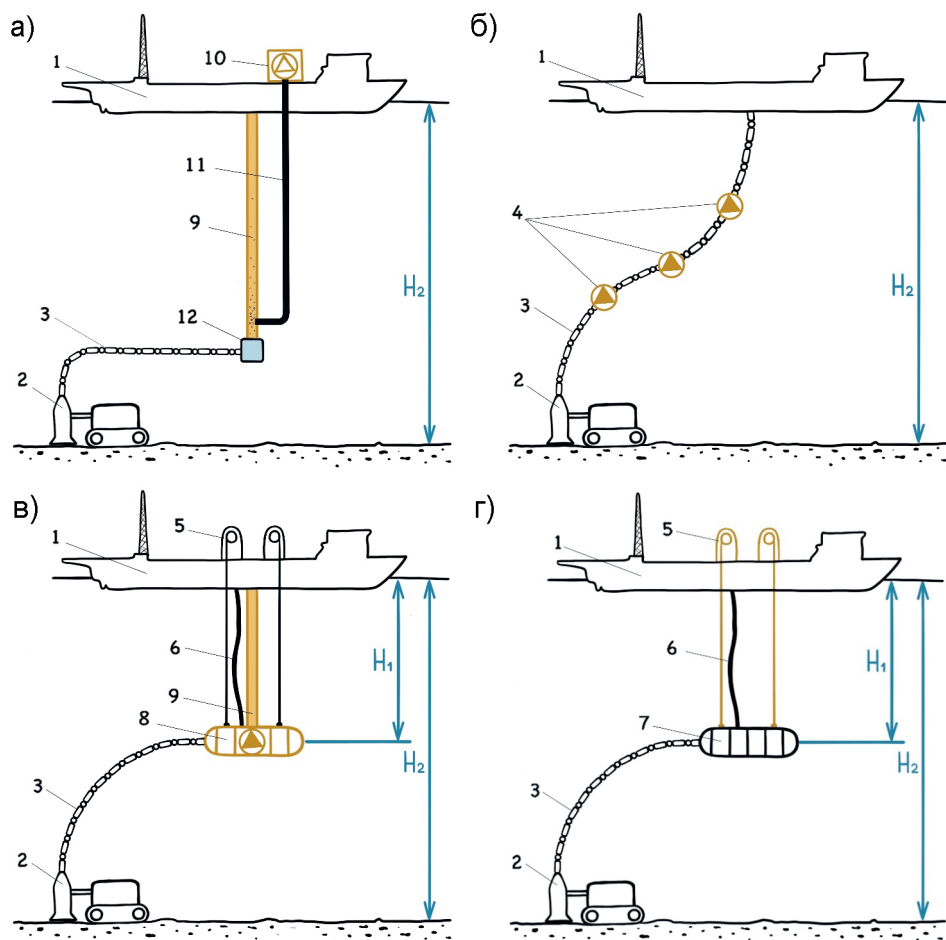
Насосная система гидроподъема представляет из себя многозвенный трубопровод 3 с промежуточно расположенными насосами 4, и, в зависимости от требуемых напорно-расходных характеристик, возможна параллельная и/или последовательная установка нескольких насосов. ТПИ перемещаются по трубопроводу 3 в виде двухфазной гидросмеси за счет работы насосов 4.

Этот способ обладает наибольшей производительностью, однако он является одновременно и самым металлоемким, энергозатратным и обладает низ-

кой надежностью, так как при выходе одного насосного комплекса из строя весь комплекс останавливается до устранения неполадок [34].

Двухстадийный подъем подразумевает наличие промежуточной капсулы с насосным оборудованием 8, обеспечи-

вающей частичный подъем за счет энергии гидростатического напора, обусловленного глубиной погружения капсулы и наличием в ней атмосферного давления, которое поддерживается по гибкому воздухопроводу 6. Это первая стадия подъема, на которой нет энергетических



H_1 – глубина погружения промежуточной капсулы; H_2 – глубина акватории в месте залегания ТПИ;

1 – морское судно; 2 – подводная горная машина с инструментом изъятия; 3 – трубопровод положительной плавучести; 4 – насосные установки; 5 – судовые лебедки; 6 – гибкий воздухопровод; 7 – промежуточная капсула; 8 – промежуточная капсула с насосным оборудованием; 9 – вертикальный трубопровод; 10 – компрессорная установка; 11 – воздухопровод; 12 – коллектор

Рис. 4. Типовые схемы технологии подъема твердых полезных ископаемых со дна: эрлифтная система подъема (а); насосная система гидроподъема (б); двухстадийная система гидроподъема (в); комбинированная система подъема (г) [составлено авторами]

Fig. 4. Typical schemes of technology for lifting solid minerals from the seabed: erlift lifting system(a); pumping hydraulic lifting system (b); two-stage hydraulic lifting system (v); combined lifting system (g) [compiled by the authors]

затрат силового оборудования. Вторая стадия подъема — из капсулы до морского судна — осуществляется за счет работы насоса, расположенного в капсуле 8, по вертикальному трубопроводу 9. Этот способ обладает значительно большими энергозатратами по сравнению с предыдущим, по причине высокого потребного напора для осуществления подъема в атмосферной среде и преодоления гравитационных сил. Спуско-подъемные операции осуществляются судовыми лебедками 5 [32].

Циклично-поточный способ похож на двухстадийный, однако предполагает исключение силового оборудования из промежуточной капсулы 7 и преодоление оставшейся части пути за счет подъема капсулы на поверхность с помощью судовых лебедок 5. Таким образом повышается надежность комплекса за счет отсутствия необходимости в обслуживании оборудования внутри капсулы, а во время спуско-подъемных операций добычная машина продолжает ра-

боту, накапливая ТПИ во внутреннем бункере. Однако при реализации данного способа подъема необходимо сократить время спуско-подъемных операций до минимума, сохранив при этом высокую производительность. Таким образом, необходимо оценить эффективность применения данного способа.

Оценка энергоэффективности технологий подъема

При реализации технологии глубоководной добычи твердых полезных ископаемых наиболее важным фактором является энергетическая эффективность системы подъема. Критерий энергетической эффективности оценивался энергоемкостью процесса подъема — удельным показателем, который определяется как отношение затраченной энергии на подъем горной массы к производительности системы подъема:

$$E = N / A, \quad (1)$$

где E — энергоемкость процесса подъема, кВт·ч/т; N — затраченная мощность

Таблица 4

Расчет производительности и потребляемой энергии типовых технологий подъема [составлено авторами]
Calculation of capacity and energy consumption of typical lifting technologies [compiled by the authors]

Система подъема	Мощность	Производительность
Цикличная	$n \cdot (S_k \cdot v_{\text{под}}) / \mu_n$	$(V_k \cdot k \cdot \rho_{\text{пи}}) / T$
Поточная (насос)	$n \cdot (\rho_{\text{см}} \cdot g \cdot H \cdot Q) / \mu$	$C_{\text{об}} \cdot v_{\text{см}} \cdot \omega_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пи}}$
Поточная (эрлифт)	$n \cdot (\rho_{\text{см}} \cdot g \cdot H \cdot Q) / \mu + N$	$C_{\text{об}} \cdot v_{\text{см}} \cdot \omega_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пи}}$
Поточная двухстадийная	$n \cdot (\rho_{\text{см}} \cdot g \cdot H \cdot Q) / \mu + n \cdot (S_k \cdot v_{\text{под}}) / \mu_n$	$C_{\text{об}} \cdot v_{\text{см}} \cdot \omega_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пи}}$
Циклично-поточная	$n \cdot (S_k \cdot v_{\text{под}}) / \mu_n$	$(V \cdot C_{\text{об}} \cdot \rho_{\text{пи}}) / T$

Примечание. S_k — тяговое усилие каната, Н; $v_{\text{под}}$ — скорость подъема сосуда, м/с; n — количество силовых агрегатов (насос или лебедка), шт; μ_n — КПД механизма; V_k — полезный объем ковша, м³; $\rho_{\text{пи}}$ — плотность гидросмеси кг/м³; k — коэффициент заполнения внутреннего объема ТПИ; H — потребный напор системы, м; Q — расход гидросмеси, м³/с; $C_{\text{об}}$ — объемная концентрация гидросмеси; N — мощность компрессора для эрлифта, кВт ($N \approx 500$ кВт); $v_{\text{см}}$ — скорость смеси, м/с; $\omega_{\text{тр}}$ — живое сечение трубопровода, м²; s — главная полуось эллипсоида капсулы, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; V — внутренний объем капсулы, м³; ρ_n — плотность капсулы, кг/м³; ρ — плотность воды, кг/м³; $\rho_{\text{пи}}$ — плотность твердого вещества, т/м³; C — коэффициент гидродинамического сопротивления; v_k — скорость погружения капсулы, м/с; T — время цикла (опускание, загрузка, подъем, разгрузка, вспомогательные операции), с.

оборудования, осуществляющего подъем, кВт; A — производительность системы подъема, т/ч. Формулы для определения мощности и производительности представлены в табл. 4.

В данной работе рассматривается только система подъема и не учитываются энергоемкость судовых машин, добычных устройств и выемочно-погрузочных работ, так как предполагается, что они приблизительно равны во всех случаях. Также принято условие, при котором требования систем подъема в полной мере удовлетворяются другими системами глубоководного добычного комплекса. Кроме того, стоит отметить,

что подводная горная машина с инструментом изъятия и выемочно-погрузочные работы в целом будут выбираться исходя из требуемой производительности комплекса, горно-геологических условий и особенностей залегания конкреций, экологических ограничений и в меньшей степени будут зависеть от выбранной системы подъема. Расчет всех систем подъема осуществлялся для обеспечения производительности 1 млн т/год. Исходные значения для каждого расчета представлены в табл. 5.

Расчет циклической технологии подъема осуществлялся по методике [35, 36]. Основным исполнительным органом при

Таблица 5

Исходные данные расчета производительности

и мощности оборудования [составлено авторами]

Input data for calculation of productivity and energy consumption [compiled by the authors]

Показатель	Системы подъема				
	циклическая	поточная (насос)	поточная (эрлифт)	поточная (двухстадийная)	циклично-поточная
S_k , кН	300 – 650	—	—	—	15 618
$v_{\text{под}}$	0,04 – 4,5	—	—	—	1,88
μ	0,8	0,7	0,3	0,7	0,75
n	3	1	2	3	2
$\rho_{\text{см}}$, кг/м ³	—	1066	960	1066	—
H , м	—	498,5	411,3	1852	—
Q , м ³ /с	—	0,2777	0,2777	0,2777	—
$v_{\text{см}}$, м/с	—	2,22	2,2	2,22	—
$\omega_{\text{тр}}$, м ²	—	0,196	0,196	0,196	—
V , м ³	—	—	—	—	3000
V_k , м ³	42	—	—	—	—
ρ_r , кг/м ³	—	—	—	—	1234
ρ , кг/м ³	—	—	—	—	1030
$C_{\text{об}}$	0,6	0,03	0,03	0,03	0,03
$\rho_{\text{пи}}$, т/м ³	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
C	—	—	—	—	0,36
v_k , м/с	—	—	—	—	1,82
T , с	3225	—	—	—	6765 – 10 216

таким способе подъема является сам грейфер, таким образом, операции добычи и подъема совмещены в одном аппарате. Производительность в таком случае рассчитывается по следующей формуле:

$$G = (V_k \cdot k \cdot \rho_{\text{пи}}) / T, \quad (2)$$

где V_k — внутренний объем грейфера, м^3 ; k — коэффициент заполнения внутреннего объема ТПИ; T — время цикла, ч. В свою очередь, время цикла рассчитывается следующим образом:

$$T = (t_{\text{погр}} + t_{\text{загр}} + t_{\text{подъема}} + t_{\text{разг}} + t_{\text{всп}}) \cdot 1,1, \quad (3)$$

где $t_{\text{погр}}$ — время, затрачиваемое на погружение, ч; $t_{\text{загр}}$ — время, затрачиваемое на загрузку, ч; $t_{\text{подъема}}$ — время, затрачиваемое на подъем, ч; $t_{\text{разг}}$ — время, затрачиваемое на разгрузку, ч; $t_{\text{всп}}$ — время, затрачиваемое на вспомогательные операции, ч. Стоит отметить, что значение объема грейфера и коэффициент его заполнения выбраны с учетом необходимости конкурировать с другими вариантами подъема. Таким образом, можно сказать, что нами принята максимально возможная производительность циклического способа подъема и изменение параметров не окажет характерного влияния на сравнение систем.

Для осуществления спуско-подъемных операций грейфера необходима лебедка с приводным оборудованием. В таком случае мощность лебедки рассчитывается по следующей формуле:

$$N = n \cdot (S_k \cdot v_{\text{под}}) / \mu_n, \quad (4)$$

где S_k — тяговое усилие каната, Н; $v_{\text{под}}$ — скорость подъема грейфера, м/с ; n — количество потребных лебедок, шт; μ_n — КПД механизма. Таким образом, ключевым параметром, влияющим на мощность, является тяговое усилие каната, так как данные параметров зависят от глубины погружения лебедки, за счет линейно возрастающей массы ка-

ната. Стоит отметить, что при опускании грейфера погружается под действием силы тяжести в свободном падении. Таким образом, потребная мощность лебедки будет определяться временем подъема.

Расчет мощности поточных систем связан с определением гидравлической мощности потока:

$$N = \rho_{\text{см}} \cdot g \cdot H \cdot Q, \quad (5)$$

где Q — расход гидросмесей, $\text{м}^3/\text{с}$; $\rho_{\text{см}}$ — плотность гидросмеси, кг/м^3 ; H — потребный напор гидротранспортной системы, м. Гидротранспортной машиной, осуществляющей подъем гидросмеси, является насос с приводным оборудованием, поэтому для оценки энергетических затрат формула (5) преобразуется в формулы, представленные в табл. 4 для соответствующей поточной технологии.

Расчет производительности любой поточной системы может быть оценен массовым расходом системы при заданной объемной концентрации $C_{\text{об}}$:

$$Q_{\text{тв}} = C_{\text{об}} \cdot v_{\text{см}} \cdot \omega_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{пи}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{тв}}$ — производительность поточной транспортной системы, т/с ; $v_{\text{см}}$ — скорость смеси, м/с ; $\omega_{\text{тр}}$ — живое сечение трубопровода, м^2 ; $\rho_{\text{пи}}$ — плотность твердого вещества, т/м^3 . При этом производительность поточной системы также можно выразить через расход гидросмеси:

$$Q_{\text{тв}} = C_{\text{об}} \cdot Q \cdot \rho_{\text{пи}}. \quad (7)$$

Стоит отметить, что скорость смеси задавалась с учетом выполнения условия гидроподъема твердого вещества заданной крупности и концентрации. Для объективной оценки производительности представленных поточных транспортных систем объемная концентрация и живое сечение трубопровода выбирались одинаковыми, их значения представлены в табл. 5. При этом стоит отметить, что изменение указанных пара-

метров может привести к изменениям графика, представленного на рис. 5.

Как видно из формулы (7), при соблюдении равенства производительности ключевым параметром, влияющим на энергозатраты, является потребный напор гидротранспортной системы. Потребный напор эрлифтной системы можно определить следующим образом [37, 38]:

$$H = \Delta h_{\text{под}} + \Delta h_{\text{тр.вс}} + \Delta h_{\text{м}} + \Delta h_{\text{тр.нг}} + \Delta h_{\text{уск}} + \Delta h_0, \quad (8)$$

где $\Delta h_{\text{под}}$ — потери напора на поддержание твердой фракции во взвеси; $\Delta h_{\text{тр.вс}}$ — потери напора на трение во всасывающей линии трубопровода; $\Delta h_{\text{м}}$ — потери напора на преодоление местных сопротивлений во всасывающей линии; $\Delta h_{\text{тр.нг}}$ — потери напора на трение в нагнетательной линии; $\Delta h_{\text{уск}}$ — потери напора на ускорение смеси; Δh_0 — потери напора на переподем смеси. Основная часть потребного напора складывается из потерь напора на трение во всасывающей и нагнетательной линиях трубопровода [37], которые в свою очередь зависят от длины трубопровода, определяемого глубиной разработки.

Потребный напор насосной системы зависит от удельных потерь напора [38–40], которые складываются из потерь напора на течение чистой воды I_0 , дополнительных потерь напора на преодоление сопротивлений, вызванных перемещением твердых частиц, взвешивания столба гидросмеси $\sum I$ и местных потерь напора и могут быть определены по формуле [38–40]

$$I_{\text{см}} = I_0 \cdot (k + \sum I) = \left\{ \lambda \frac{v_{\text{см}}^2}{2gD} \left[k + 145 \cdot C_0 \frac{gD}{v_{\text{см}}^2} \cdot \frac{w}{\sqrt{gD}} \right] \right\}, \quad (9)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления, который в общем виде является функцией числа Рейнольдса (Re)

и относительной шероховатости (ε), т.е. $\lambda = f(Re, \varepsilon)$, однако для развитого турбулентного режима движения гидросмеси, характерного для трубопроводного транспорта, коэффициент гидравлических сопротивлений можно определить по известной формуле Шифринсона $\lambda = 0,11(\varepsilon)^{0,25}$; D — диаметр трубопровода, м; $v_{\text{см}}$ — скорость потока, м/с; w — скорость свободного падения твердых частиц в воде (гидравлическая крупность), м/с; k — коэффициент, учитывающий местные потери напора и несложную геометрию вертикального трубопровода. Удельные потери напора отнесены к длине трубопровода, поэтому для определения потребного напора системы можно воспользоваться формулой

$$H = I_{\text{см}} \cdot L, \quad (10)$$

где L — длина трубопровода, зависящая от глубины разработки.

Расчет циклично-поточной технологии осуществлялся на основании расчета поточной и цикличной технологий подъема. Внутренний объем капсулы определяется по формуле

$$V = 4/3 \cdot \pi \cdot (a - 2l) \cdot (b - 2l) \cdot (c - 2l), \quad (11)$$

где a , b , c — соответственно малая, средняя и главная ось промежуточной капсулы, м; l — толщина стенки капсулы, м.

$$a = x \cdot c, \quad (12)$$

$$b = y \cdot c, \quad (13)$$

где x — отношение малой оси к главной; y — отношение средней оси к главной.

Отношение осей x и y учитывает форму капсулы и изменяется в диапазоне 0,1...1. Причем при значении отношения 1 капсула принимает форму шара. Толщина стенки капсулы рассчитывается исходя из требований прочности и выполнения условия погружения твердого тела в воду, а именно преобладания силы тяжести над силой Архимеда.

Плотность полезного ископаемого является исходной величиной и зависит от конкретного разрабатываемого месторождения. Показатель объемной концентрации гидросмеси зависит от степени первичного дробления ТПИ, а также глубины погружения капсулы. Однако для проведения сравнительного расчета значение концентрации принято равным концентрации гидросмеси при поточном способе подъема. Заполнение капсулы происходит за счет разницы гидростатического напора при соблюдении условия устойчивого процесса гидроподъема, причем загрузка капсулы осуществляется без энергетических затрат силового оборудования [41].

Время цикла для циклично-поточно-го способа рассчитывается по следующей формуле:

$$T = (t_{\text{погр}} + t_{\text{загр}} + t_{\text{подъема}} + t_{\text{разг}} + t_{\text{всп}}) \cdot 1,1, \quad (14)$$

где $t_{\text{погр}}$ — время, затрачиваемое на погружение, с; $t_{\text{загр}}$ — время, затрачиваемое на загрузку, с; $t_{\text{подъема}}$ — время, затрачиваемое на подъем, с; $t_{\text{разг}}$ — время, затрачиваемое на разгрузку, с; $t_{\text{всп}}$ — время, затрачиваемое на вспомогательные операции, с.

$$t_{\text{погр}} = H / v_{\text{к}} \quad (15)$$

$$t_{\text{загр}} = V_{\text{в}} / Q \quad (16)$$

$$t_{\text{подъема}} = H / v_{\text{подъема}}, \quad (17)$$

где $v_{\text{подъема}}$ — скорость подъема капсулы, м/с.

$$v_{\text{подъема}} = (\pi \cdot D_{\text{б}} \cdot n_{\text{ном}}) / (60 \cdot i_{\text{ред}}), \quad (18)$$

где $D_{\text{б}}$ — диаметр барабана лебедки, м; $n_{\text{ном}}$ — частота вращения барабана, об/мин; $i_{\text{ред}}$ — передаточное число редуктора. Время, затрачиваемое на разгрузку и вспомогательные операции, постоянно, принято исходя из опыта шахтного подъема и равно $t_{\text{разг}} = 900$ с, $t_{\text{всп}} = 480$ с. Точные значения времени разгрузки и вспомогательных операций

должны быть рассчитаны и получены опытным путем.

Для осуществления спуско-подъемных операций капсулы также предусмотрена лебедка с приводным оборудованием, мощность которой может быть определена по формуле (4), однако подъем осуществляется со значительно меньшей глубины, вследствие специфики применяемой технологии.

Область применимости добычных технологий

Ввиду широкого распространения ЖМК по морскому дну и, как следствие, разнообразных глубин залегания следует определить границы применимости технологий. В рамках реализации глубоководного комплекса необходимо учитывать не только финансовую составляющую, но также и энергетическую.

На рис. 5 видно, что при увеличении глубины разработки месторождения энергоемкость процесса подъема увеличивается во всех случаях.

Наиболее энергозатратным способом является двухстадийный гидроподъем, однако он имеет перспективы применения в условиях шельфовой добычи. Наиболее простым с технической точки зрения и достаточно эффективным до глубин 1200 м является цикличный способ, также он получил широкое распространение при ведении геологоразведочных работ. Наиболее перспективными являются эрлифтная система, насосная система гидроподъема и циклично-поточный способ.

При глубинах акватории более 3600 м наиболее энергоэффективной является циклично-поточная технология, так как она имеет наименьшее значение энергоемкости для указанной глубины — 10 кВт·ч/т.

Эта особенность обусловлена малой зависимостью технологии от глубины разработки, так как с ее ростом необхо-

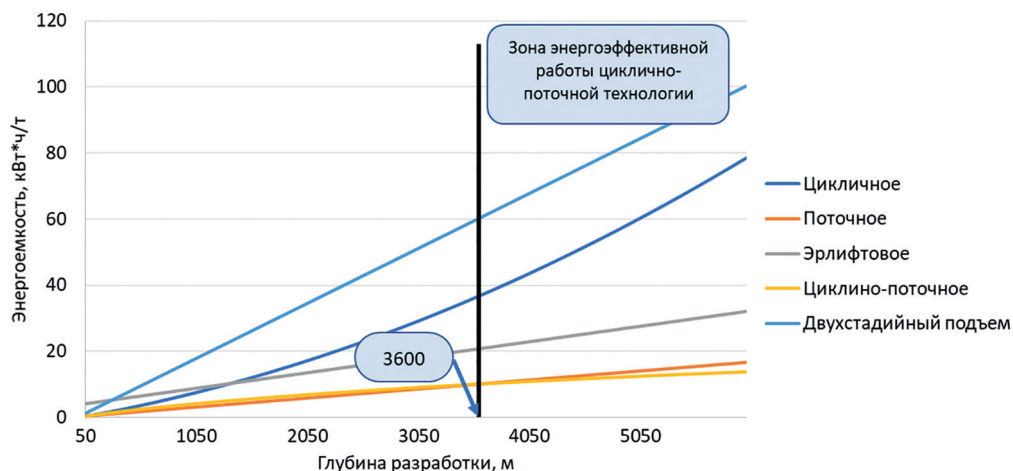


Рис. 5. Энергетическая эффективность глубоководной добычи твердых полезных ископаемых [составлено авторами]

Fig. 5. Energy efficiency of deep-sea mining of solid minerals [compiled by the authors]

дмаяя высота погружения капсулы растет незначительно. В этой связи ограничивающим фактором циклично-поточного способа подъема является производительность промежуточной капсулы. Следовательно, при определении оптимальных параметров капсулы можно достичь наибольшей энергоэффективности.

Годовая производительность технологии подъема с промежуточной капсулой

По удельной производительности циклично-поточный способ наиболее рационален для использования при разработке твердых полезных ископаемых на глубинах, превышающих 3600 м. Используем формулу из табл. 4 для расчета

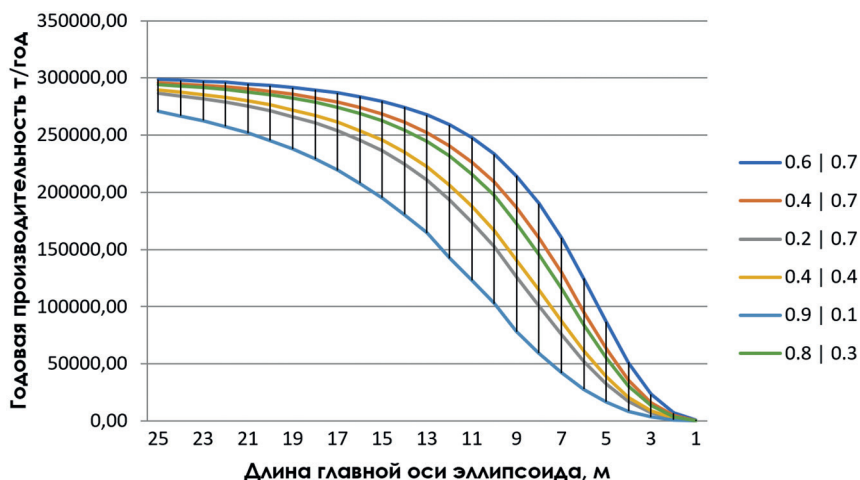


Рис. 6. Зависимость производительности от соотношения осей промежуточной капсулы [составлено авторами]

Fig. 6. Performance dependence on the axis ratio of the intermediate capsule [compiled by the authors]

производительности циклично-поточного способа подъема и определения оптимальных параметров.

Таким образом, принимая исходные данные из табл. 5, получим, что при увеличении значения главной оси эллипсоида значение производительности промежуточной капсулы стремится к 300 тыс. т/год (рис. 6). При сравнительно одинаковых энергозатратах годовая производительность позволяет исполнить предписание МОМДа и достичь необходимых объемов производства. Однако в таком случае необходимо использовать порядка 10–12 капсул, что подразумевает большое количество судов и обслуживающего персонала, а значит, приведет к низкой экономической рентабельности проекта. В таком случае необходимо разработать систему обеспечения 12 капсул при помощи единого плавсредства.

Однако необходимо учитывать ограничения, которые возникают при проведении прочностного расчета и при расчете коэффициента гидродинамического сопротивления. В настоящий момент не существует действенных методик для определения коэффициента общего сопротивления, поэтому определяться он должен эмпирически. Проведение эксперимента сопряжено с некоторыми факторами, в частности, с учетом изменения плотности воды при погружении, температуры, вязкости и прочих параметров, не позволяющих точно определить значение сопротивления.

Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы.

- На первичном этапе среди рентабельных глубоководных твердых полезных ископаемых выделяют три основных типа: железомарганцевые конкреции (ЖМК), кобальтоносные железомарганцевые корки (КМК), глубоководные по-

лиметаллические сульфиды (ГПС). Они обладают уникальным минеральным составом, но объединены пластовым расположением в слое поверхности морского дна; тем самым при их разработке отсутствует необходимость в проведении больших объемов вскрышных работ.

- Анализируя научные решения и опыт в данной области, можно сделать вывод, что технология глубоководной разработки твердых полезных ископаемых — это комплекс процессов изъятия, поднятия и транспортировки твердых полезных ископаемых со дна Мирового океана до места сбыта. Перечисленные процессы исполняют определенные машины или установки, образующие единый комплекс, взаимосвязанный в пространстве и времени. Комплекс по добыче глубоководных твердых полезных ископаемых обеспечивает энергетически эффективную и производительную разработку месторождения.

- Оценка энергетической эффективности рассмотренных типовых добычных комплексов позволяет дать рекомендации по использованию той или иной системы подъема в зависимости от глубины разработки месторождения. При этом рассматривая глубины залегания ЖМК, КМК и ГПС, можно сделать вывод, что, с энергетической точки зрения, наиболее перспективным является циклично-поточный способ подъема.

- Анализ системы подъема при помощи промежуточной капсулы позволяет сделать вывод о существовании предельной производительности системы около 300 тыс. т в год при максимальной длине оси капсулы 25 м.

Дальнейшие исследования будут направлены на выявление зависимости годовой производительности от коэффициента гидродинамического сопротивления.

При определении коэффициента планируется приблизиться к созданию ре-

альных условий залегания месторождения, включая такие показатели, как температура, давление, плотность воды. Также будут учитываться показатели промежуточной капсулы, такие как материал исполнения, обработка поверх-

ности и масса. Планируется провести компьютерное моделирование для определения прочностных характеристик и разработки рекомендаций по габаритным характеристикам, таким как длина оси, толщина стенки и прочие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leng D., Shao S., Xie Y., Wang H., Liu G.* A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle // *Ocean Engineering*. 2021, vol. 228, 108565. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108565.
2. Юбко В. М., Пономарева И. Н., Лыгина Т. И. Геологоразведочные работы на месторождении железомарганцевых конкреций в зоне Кларион—Клиппертон Тихого океана: история и результаты исследований // *Океанологические исследования*. — 2023. — Т. 51. — № 4. — С. 90—134. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).5.
3. Котилов Д. А., Шабаров А. Н., Цирель С. В. Установление связи между распределением сейсмособытий в массиве горных пород и его тектоническим строением // *Горный журнал*. — 2020. — № 1. — С. 28—32. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05.
4. *Baturin G. N.* Distribution of elements in ferromanganese nodules in seas and lakes // *Lithology and Mineral Resources*. 2019, vol. 54, pp. 362—373. DOI: 10.1134/s002449021905002x.
5. *Toro N., Jeldres R. I., Ordenes J. A., Robles P., Navarra A.* Manganese nodules in Chile, an alternative for the production of Co and Mn in the future—A review // *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 8, article 674. DOI: 10.3390/min10080674.
6. *Fritz B., Heidak P., Vasters J., Kuhn T., Franken G., Schmidt M.* Life cycle impact on climate change caused by metal production from deep sea manganese nodules versus land-based deposits // *Resources, Conservation and Recycling*. 2023, vol. 193. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106976.
7. *Sparenberg O.* A historical perspective on deep-sea mining for Manganese nodules, 1965—2019 // *Extractive Industries and Society*. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 842—854. DOI: 10.1016/j.exis.2019.04.001.
8. *Okamoto N., Shiokawa S., Kawano S., Sakurai H., Yamaji N., Kurihara M.* Current status of Japan's activities for deep-sea commercial mining campaign / 2018 Oceans — MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). 2018, pp. 1—7. DOI: 10.1109/OCEANSKOBE.2018.8559373.
9. *Koteleva N., Valnev V.* Automatic detection of maintenance scenarios for equipment and control systems in industry // *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, article 12997. DOI: 10.3390/app132412997.
10. *Nikolaichuk L., Sinkov L., Malisheva A.* Analysis of the problems and development prospects of the oil refining industry of Russia // *Journal of Business and Retail Management Research*. 2017, no. 4, vol. 11, pp. 177—183. DOI: 10.24052/jbrmr/v11is04/aotpadpotorior.
11. *Belkin I. M., Andersson P. S., Langhof J.* On the discovery of ferromanganese nodules in the World Ocean // *Deep Sea Research, Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021, vol. 175, article 103589. DOI: 10.1016/j.dsr.2021.103589.
12. *Wang S., Yang X., Li L., Sun P., Yang L., Li F.* Shear behaviour of a rock bridge sandwiched between incipient joints under the influence of hydraulic pressures // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023, vol. 33, no. 2, pp. 233—242. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.10.007.
13. *Mbani B., Greinert J.* Analysis-ready optical underwater images of manganese-nodule covered seafloor of the Clarion-Clipperton Zone // *Scientific Data*. 2023, vol. 10, article 316. DOI: 10.1038/s41597-023-02245-5.
14. *Lu C. Y., Yang J. M.* Path planning of subsea mining vehicle / *Proceedings of the Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes*. 2021, pp. 1083—1115. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.
15. *Zenghui Liu, Kai Liu, Xuguang Chen, Zhengkuo Ma, Rui Lv, Changyun Wei, Ke Ma* Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023, vol. 33, no. 9, pp. 1083—1115. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.
16. *Toro N., Robles P., Jeldres R. I.* Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy. A critical review // *Ore Geology Reviews*. 2020, vol. 126, article 103699. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103699.

17. Atmanand M. A., Ramadass G. A. Concepts of deep-sea mining technologies // Deep-sea mining. Cham: Springer, 2017, pp. 305–343. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_10.
18. White M., Manocchio A., Lowe J., Johnston M., Sant T. Resource drilling of the Solwara 1 seafloor massive sulfide (SMS) deposit / Proceedings of offshore technology conference. Houston, OnePetro, 2011, pp. 1–11. DOI: 10.4043/21645-MS.
19. Lee C. H., Kim H. W., Choi J. S., Yeu T. K., Lee M. U., Oh J. W., Hong S. Study of deep-sea mining robot «MineRo» using table of orthogonal arrays // Journal of Ocean Engineering and Technology. 2014, vol. 28, no. 2, pp. 152–159. DOI: 10.5574/KSOE.2014.28.2.152.
20. Tang Y. C., Duan W. D., Qiao Z. L., Jiang P., Hu H. C. Experimental study on rock fragmentation of underwater blasting // Blasting. 2016, vol. 33, pp. 102–106. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104797.
21. Teague J., Allen M. J., Scott T. B. The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring // Ocean Engineering. 2018, vol. 147, pp. 333–339. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.10.046.
22. Knodt S., Kleinen T., Dornieden C., Lorscheidt J., Bjørneklett B., Mitzlaff A. Development and engineering of offshore mining systems-state of the art and future perspectives / Proceedings of offshore technology conference. Houston, OnePetro, 2016, pp. 1–22. DOI: 10.4043/27185-MS.
23. Hu Q., Li Z., Zhai X., Zheng H. Development of hydraulic lifting system of deep-sea mineral resources // Minerals. 2022, vol. 12, article 1319. DOI: 10.3390/min12101319.
24. Schneider D. Deep-sea mining stirs up muddy questions. A controversial pilot program will collect metal-rich nodules from the ocean floor // IEEE Spectrum. 2022, vol. 59, no. 1, pp. 56–57. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.
25. Volz J. B., Geibert W., Köhler D., Michiel M., van der Loeff R., Kasten S. Alpha radiation from polymetallic nodules and potential health risks from deep-sea mining // Scientific Reports. 2023, vol. 13, article 7985. DOI: 10.1038/s41598-023-33971-w.
26. Duncombe J. The 2-year countdown to deep-sea mining // Eos. 2022, vol. 103. DOI: 10.1029/2022EO220040.
27. Zhukovskiy Y., Koshenkova A., Vorobeva V., Rasputin D., Pozdnyakov R. Assessment of the impact of technological development and scenario forecasting of the sustainable development of the fuel and energy complex // Energies. 2023, vol. 16, no. 7, article 3185. DOI: 10.3390/en16073185.
28. Федорова Э. Р., Пупышева Е. А., Моргунов В. В. Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов // Цветные металлы. — 2023. — № 4. — С. 77–85. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.10.
29. Ushkova T., Kopteva A., Shpenst V., Sutikno T., Jopri M. H. In-line measurement of multiphase flow viscosity // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2022, vol. 11, no. 6, pp. 3609–3616. DOI: 10.11591/eei.v11i6.4856.
30. 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.
31. Евдокимов А. Н., Пхарое Б. Л. Индикаторная роль редких и редкоземельных элементов Северо-Западного рудопроявления марганца (ЮАР) в генетической модели гипергенных марганцевых месторождений // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 814–825. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.4.
32. Юнгмейстер Д. А., Судариков С. М., Киреев К. А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций // Записки Горного института. — 2019. — Т. 235. — С. 88. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88.
33. Yang J., Liu L., Lyu H., Lin Zh. Deep-sea mining equipment in China: current status and prospect // Strategic Study of Chinese Academy of Engineering. 2020, vol. 22, no. 6, pp. 1–9. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2020.06.001.
34. Сержан С. Л., Скребнев В. И., Малеванный Д. В. Исследование влияния шероховатости стальных и полимерных труб на потери напора при гидротранспорте хвостовой пульпы // Обогащение руд. — 2023. — № 4. — С. 41–49. DOI: 10.17580/or.2023.04.08.
35. Юнгмейстер Д. А., Королев Р. И., Бородин Э. О. Обоснование конструкции технических средств для извлечения глубоководных полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 55. — С. 3–13. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-5-3-13.

36. 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.

37. Козыряцкий Л. М., Моргунов В. М., Яковлев В. М., Геммерлинг О. А. Эрлифты и гидроэлеваторы в горной промышленности: учебное пособие. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 160 с.

38. Малухин Н. Г., Дробаденко В. П., Вильмис А. Л. Научно-методическое обоснование эрлифтного гидроподъема при освоении месторождений дна морей и океанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S11. — С. 51—60.

39. Александров В. И., Собота Е. Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья // Записки Горного института. — 2015. — Т. 213. — С. 9—17.

40. Александров В. И., Собота Е. Моделирование и расчет системы гидравлического подъема горной массы при подводной разработке минерального сырья // Записки Горного института. — 2003. — Т. 157. — С. 140—143.

41. Егоров И. В., Жабин А. Б., Поляков А. В. Определение рациональных параметров гидро-транспорта твердых полезных ископаемых в системе гидроподъема с подводной станцией // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2019. — № 9. — С. 89—97. **ГИАН**

REFERENCES

1. Leng D., Shao S., Xie Y., Wang H., Liu G. A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle. *Ocean Engineering*. 2021, vol. 228, 108565. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108565.

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

3. Kotikov D. A., Shabarov A. N., Tsirel S. V. Connecting seismic event distribution and tectonic structure of rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 28—32. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.01.05.

4. Baturin G. N. Distribution of elements in ferromanganese nodules in seas and lakes. *Lithology and Mineral Resources*. 2019, vol. 54, pp. 362—373. DOI: 10.1134/s002449021905002x.

5. Toro N., Jeldres R. I., Ordenes J. A., Robles P., Navarra A. Manganese nodules in Chile, an alternative for the production of Co and Mn in the future—A review. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 8, article 674. DOI: 10.3390/min10080674.

6. Fritz B., Heidak P., Vasters J., Kuhn T., Franken G., Schmidt M. Life cycle impact on climate change caused by metal production from deep sea manganese nodules versus land-based deposits. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023, vol. 193. DOI: 10.1016/j.resconrec.2023.106976.

7. Sparenberg O. A historical perspective on deep-sea mining for Manganese nodules, 1965—2019. *Extractive Industries and Society*. 2019, vol. 6, no. 3, pp. 842—854. DOI: 10.1016/j.exis.2019.04.001.

8. Okamoto N., Shiokawa S., Kawano S., Sakurai H., Yamaji N., Kurihara M. Current status of Japan's activities for deep-sea commercial mining campaign. *2018 Oceans — MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)*. 2018, pp. 1—7. DOI: 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559373.

9. Koteleva N., Valnev V. Automatic detection of maintenance scenarios for equipment and control systems in industry. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, article 12997. DOI: 10.3390/app132412997.

10. Nikolaichuk L., Sinkov L., Malisheva A. Analysis of the problems and development prospects of the oil refining industry of Russia. *Journal of Business and Retail Management Research*. 2017, no. 4, vol. 11, pp. 177—183. DOI: 10.24052/jbrmr/v11is04/aotpadpotior.

11. Belkin I. M., Andersson P. S., Langhof J. On the discovery of ferromanganese nodules in the World Ocean. *Deep Sea Research, Part I: Oceanographic Research Papers*. 2021, vol. 175, article 103589. DOI: 10.1016/j.dsr.2021.103589.

12. Wang S., Yang X., Li L., Sun P., Yang L., Li F. Shear behaviour of a rock bridge sandwiched between incipient joints under the influence of hydraulic pressures. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023, vol. 33, no. 2, pp. 233—242. DOI: 10.1016/j.ijmst.2022.10.007.

13. Mbani B., Greinert J. Analysis-ready optical underwater images of manganese-nodule covered seafloor of the Clarion-Clipperton Zone. *Scientific Data*. 2023, vol. 10, article 316. DOI: 10.1038/s41597-023-02245-5.
14. Lu C. Y., Yang J. M. Path planning of subsea mining vehicle. *Proceedings of the Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes*. 2021, pp. 1083 – 1115. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.
15. Zenghui Liu, Kai Liu, Xuguang Chen, Zhengkuo Ma, Rui Lv, Changyun Wei, Ke Ma Deep-sea rock mechanics and mining technology: State of the art and perspectives. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2023, vol. 33, no. 9, pp. 1083 – 1115. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.
16. Toro N., Robles P., Jeldres R. I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy. A critical review. *Ore Geology Reviews*. 2020, vol. 126, article 103699. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103699.
17. Atmanand M. A., Ramadass G. A. Concepts of deep-sea mining technologies. *Deep-sea mining*. Cham: Springer, 2017, pp. 305 – 343. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_10.
18. White M., Manocchio A., Lowe J., Johnston M., Sant T. Resource drilling of the Solwara 1 seafloor massive sulfide (SMS) deposit. *Proceedings of offshore technology conference*. Houston, OnePetro, 2011, pp. 1 – 11. DOI: 10.4043/21645-MS.
19. Lee C. H., Kim H. W., Choi J. S., Yeu T. K., Lee M. U., Oh J. W., Hong S. Study of deep-sea mining robot «MineRo» using table of orthogonal arrays. *Journal of Ocean Engineering and Technology*. 2014, vol. 28, no. 2, pp. 152 – 159. DOI: 10.5574/KSOE.2014.28.2.152.
20. Tang Y. C., Duan W. D., Qiao Z. L., Jiang P., Hu H. C. Experimental study on rock fragmentation of underwater blasting. *Blasting*. 2016, vol. 33, pp. 102 – 106. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104797.
21. Teague J., Allen M. J., Scott T. B. The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring. *Ocean Engineering*. 2018, vol. 147, pp. 333 – 339. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.10.046.
22. Knodt S., Kleinen T., Dornieden C., Lorscheidt J., Bjørneklett B., Mitzlaff A. Development and engineering of offshore mining systems-state of the art and future perspectives. *Proceedings of offshore technology conference*. Houston, OnePetro, 2016, pp. 1 – 22. DOI: 10.4043/27185-MS.
23. Hu Q., Li Z., Zhai X., Zheng H. Development of hydraulic lifting system of deep-sea mineral resources. *Minerals*. 2022, vol. 12, article 1319. DOI: 10.3390/min12101319.
24. Schneider D. Deep-sea mining stirs up muddy questions. A controversial pilot program will collect metal-rich nodules from the ocean floor. *IEEE Spectrum*. 2022, vol. 59, no. 1, pp. 56 – 57. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.
25. Volz J. B., Geibert W., Köhler D., Michiel M., van der Loeff R., Kasten S. Alpha radiation from polymetallic nodules and potential health risks from deep-sea mining. *Scientific Reports*. 2023, vol. 13, article 7985. DOI: 10.1038/s41598-023-33971-w.
26. Duncombe J. The 2-year countdown to deep-sea mining. *Eos*. 2022, vol. 103. DOI: 10.1029/2022EO220040.
27. Zhukovskiy Y., Koshenkova A., Vorobeva V., Rasputin D., Pozdnyakov R. Assessment of the impact of technological development and scenario forecasting of the sustainable development of the fuel and energy complex. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 7, article 3185. DOI: 10.3390/en16073185.
28. Fedorova E. R., Pupyshva E. A., Morgunov V. V. Settling parameters determined during thickening and washing of red muds. *Tsvetnye Metally*. 2023, no. 4, pp. 77 – 85. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.10.
29. Ushkova T., Kopteva A., Shpenst V., Sutikno T., Jopri M. H. In-line measurement of multiphase flow viscosity. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2022, vol. 11, no. 6, pp. 3609 – 3616. DOI: 10.11591/eei.v11i6.4856.
30. Sudarikov S. M., Yungmeister D. A., Korolev R. I., Petrov V. A. On the possibility of reducing man-made burden on benthic biotic communities when mining solid minerals using technical means of various designs. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 82 – 96. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.14.
31. Evdokimov A. N., Pharoe B. L. Indicator role of rare and rare-earth elements of the Northwest manganese ore occurrence (South Africa) in the genetic model of supergene manganese deposits. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 252, pp. 814 – 825. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.4.
32. Yungmeister D. A., Sudarikov S. M., Kireev K. A. Feasibility of type of deep-water technologies for the extraction of marine ferro-manganese nodules. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 235, pp. 88. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88.

33. Yang J., Liu L., Lyu H., Lin Zh Deep-sea mining equipment in China: current status and prospect. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*. 2020, vol. 22, no. 6, pp. 1–9. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2020.06.001.

34. Serzhan S. L., Skrebnev V. I., Malevanny D. V. Study of the effects of steel and polymer pipe roughness on the pressure loss in tailings slurry hydrotransport. *Obogashchenie Rud*. 2023, no. 4, pp. 41–49. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2023.04.08.

35. Yungmeister D. A., Korolev R. I., Borodkin E. O. Justification of the design of technical means for the extraction of deep-sea minerals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. S5, pp. 3–13. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-5-3-13.

36. Yungmeister D. A., Smolenskii M. P., Isaev A. I., Efimov F. A. Designs and parameters of stepping mechanisms for the complex of extraction of minerals scattered on the seabed. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11-1, pp. 159–174. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_159.

37. Koziryatskiy L. M., Morgunov V. M., Yakovlev V. M., Gemmerling O. A. *Erlifty i gidroelevatory v gornoy promyshlennosti: uchebnoe posobie* [Gemmerling O. A. Er lifts and hydroelevators in the mining industry: textbook], Vologda, Infra-Inzheneriya, 2023. 160 c.

38. Malukhin N. G., Drobadenko V. P., Vilms A. L. Scientific and methodological substantiation of erlift hydraulic lifting in the development of deposits on the seabed and ocean floor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S11, pp. 51–60. [In Russ].

39. Aleksandrov V. I., Sobota E. Specific energy intensity of hydraulic transportation of mineral raw material products. *Journal of Mining Institute*. 2015, vol. 213, pp. 9–17. [In Russ].

40. Aleksandrov V. I., Sobota E. Modeling and calculation of the system of hydraulic lifting of rock mass at underwater development of mineral raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2003, vol. 157, pp. 140–143. [In Russ].

41. Egorov I. V., Zhabin A. B., Polyakov A. V. Determination of rational parameters of hydrotransport of solid minerals in the system of hydraulic lift with an underwater station. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2019, no. 9, pp. 89–97. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сержан Сергей Леонидович¹ — канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Serzhan_SL@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2248-9156,

Малеванный Дмитрий Владимирович¹ — аспирант,

e-mail: mmmmono@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8597-8002,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Сержан С.Л., e-mail: Serzhan_SL@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.L. Serzhan¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor,

e-mail: Serzhan_SL@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-2248-9156,

D.V. Malevanny¹, Graduate Student,

e-mail: mmmmono@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-8597-8002,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: S.L. Serzhan, e-mail: Serzhan_SL@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 17.06.2024; получена после рецензии 30.10.2024; принята к печати 10.11.2024.

Received by the editors 17.06.2024; received after the review 30.10.2024; accepted for printing 10.11.2024.