

## РАСЧЕТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПРИДОННОГО ДОБЫЧНОГО УСТРОЙСТВА С ШЕСТЬЮ КОНЕЧНОСТЯМИ

*Юнгмейстер Д.А., Исаев А.И., Смоленский М.П., Беляев А.В.*  
*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** глубоководные полезные ископаемые, железомарганцевые конкреции, комплекс добычи, придонное добычное устройство.

**Аннотация.** Работа посвящена оценке и сравнению методов добычи глубоководных полезных ископаемых. Рассмотрены три вида глубоководных полезных ископаемых, их геология, глубина залегания, размеры. Произведен анализ требований к конструкции добычного агрегата. Описана конструкция предполагаемого комплекса добычи глубоководных ископаемых, где в основе лежит использование шагоходного сборщика железомарганцевых конкреций. Представлены сведения о технологии добычи железомарганцевых конкреций при помощи сборщиков с камерами разрежения. Подобран гидронасос для расчета и рассчитана скорость движения глубоководного сборщика с шестью конечностями при условном делении перемещений агрегата на фазы. На основании полученных результатов сделан вывод о преимуществе в скорости данного типа глубоководных сборщиков по сравнению с другими аналогами.

## CALCULATION OF THE VELOCITY OF A BOTTOM MINING DEVICE WITH SIX LIMBS

*Yungmeister D.A., Isaev A.I., Smolenskii M.P., Belyaev A.V.*  
*Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** deep-sea minerals, iron-manganese nodules, mining complex, near-bottom mining device.

**Abstract.** The paper is devoted to the evaluation and comparison of deep-sea mineral extraction methods. Three types of deep-sea minerals, their geology, depth of occurrence, and dimensions are considered. The requirements for the design of the mining unit are analyzed. The design of the proposed deep-water mining complex is described, which is based on the use of a walking iron-manganese nodule collector. Information about the technology of mining ferromanganese nodules using rarefaction chamber collectors is presented. A hydraulic pump is selected for calculation and speed of movement of a deep-water collector with six limbs is calculated at conditional division of displacements of the unit into phases. On the basis of the received results the conclusion about advantage in speed of the given type of deep-water collectors in comparison with other analogues is made.

### Проблематика добычи ЖМК/КМК

В Мировом океане среди глубоководных полезных ископаемых заслуживают внимание три вида: железомарганцевые конкреции (ЖМК), полиметаллические сульфиды (ГПС) и кобальтоносные марганцевые корки (КМК) [1]. Железомарганцевые конкреции располагаются на абиссальных океанических равнинах глубиной от 4000 до 6000 метров, имеют сферическую форму, диаметром от 1 до 15 см. Месторождения представляют собой сконцентрированное количество шарообразных пород, как правило, под слоем морского ила и других типов мягких отложений. Кобальтоносные марганцевые корки имеют толщину до 20 см и залегают на глубине 1000-2500 метров. Внешне представляют собой корки, покрывающие склоны подводных гор и гайотов. Глубоководные полиметаллические сульфиды располагаются на глубине от 1200 метров до 3500 метров. Образование сульфидных отложений, богатых ценными металлами, является результатом гидротермальных процессов – движений тектонических плит.

Разработка глубоководных ресурсов имеет повышенные требования к экологичности установки, к ее энергоемкости, безопасности и производительности. Большое количество предложенных технических решений [2, 3] не отвечают этим требованиям. В первую очередь это касается механических сборщиков, с рабочим органом, сгребающего типа: захват

конкреций вместе с другими донными отложениями вредит океанической биоте [4]. Для подобных условий на сегодняшний день актуальна разработка специализированных комплексов для добычи минеральных ресурсов [5].

### Конструкция комплекса добычи глубоководных полезных ископаемых

Разработан комплекс добычи глубоководных полезных ископаемых для участков, где наиболее сконцентрировано залегают конкреции. Концепция сбора базируется на использовании универсального сборщика, с исполнительными шагающими органами. Тип исполнительного органа зависит от собираемых образцов: в случае железомарганцевых конкреций исполнительным органом является камера разрежения, а в случае кобальтоносных марганцевых корок – грейфер. Геометрические параметры исполнительных органов и их количество получены в результате силового расчета и технико-экономического обоснования [6].

Комплекс представлен на рисунке 1. Судно обеспечения 1 оснащено тремя барабанными лебедками 2 в центре, на носу и корме. При нахождении судна на участке добычи полезных ископаемых, с центральной лебедки на грузонесущем кабель-тросе 3, соединенным свободным концом 4 с захватным устройством 5, спускается грузовой бункер-накопитель 6. Захватное устройство 5 (рама) имеет рулевые винты, которые осуществляют необходимое позиционирование при опускании и подъеме таким образом, чтобы ось бункера совпадала с осью агрегата для захвата, а оси подвижных замков совпадали с осями выступов на бункере. Благодаря конусным элементам крышки и бункера совпадение происходит, исключая непопадание подвижных замков.

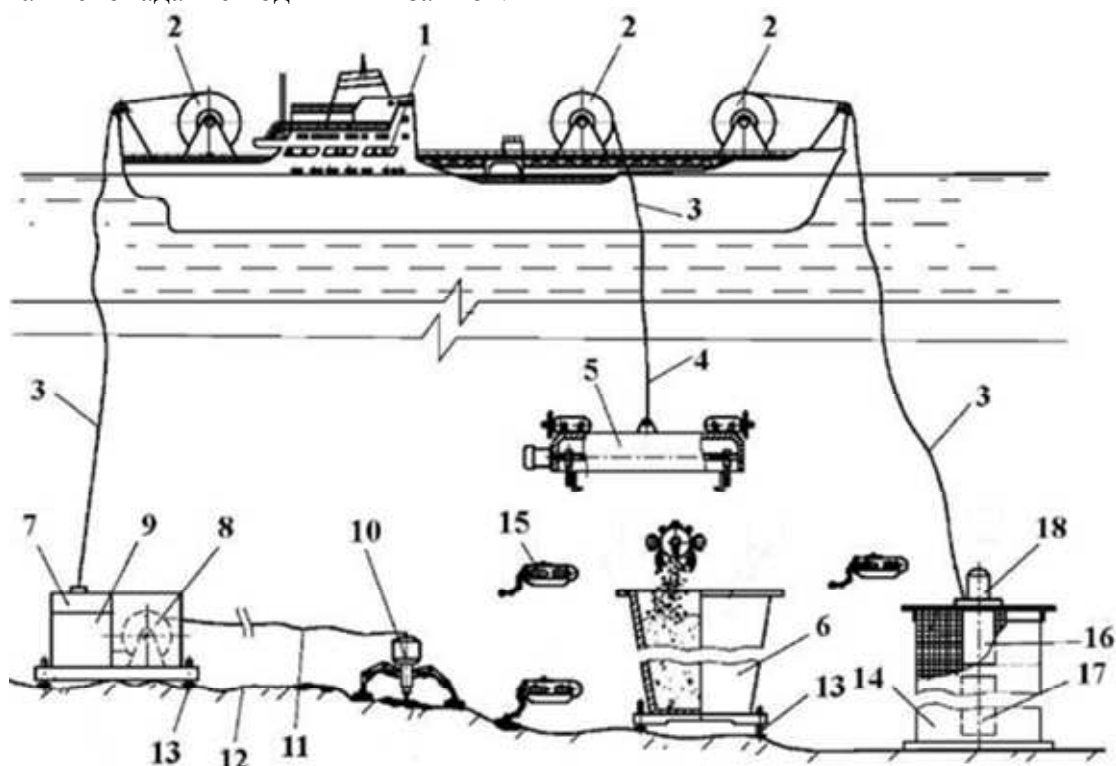


Рис. 1. Концепция сбора глубоководных полезных ископаемых

С носовой барабанной лебедки при помощи кабель-троса опускается платформа с роботами-отбойщиками 10. Питание робота-отбойщика 10 происходит посредством кабеля 11, соединенным с распределительным устройством 7, в составе которого имеется катушка 8, трансформаторные батареи 9. В целях горизонтирования платформы на поверхности морского дна 12 имеются домкраты 13.

Далее аналогично спускается бокс-ангар 14 с ячейками, в которых располагаются автономные роботы-сборщики 15. Ангар оснащен собственным блоком питания 16 с подстанцией зарядки сборщиков 17. Управление движением сборщиков происходит через сигналы, посылаемые гидроакустическим передатчиком модулем 18.

После того как полезное ископаемое оказывается на судне, проходит этап предварительного обогащения, отделяется жидкая часть – материал осушается. Для дальнейшей транспортировки может использоваться дополнительное судно-баржа.

Позиционирование и ориентация всех агрегатов и устройств происходит с помощью приемо-передатчиков, расставленных с определенным шагом, образуя координатную «сетку». Все сигналы с приемо-передатчиков проходят через центральный блок управления, находящийся на корабле обеспечения, который подает ответные сигналы управления на приемо-передатчики, а они в свою очередь пересылают сигналы на узлы и агрегаты, участвующих в сборе полезных ископаемых.

Данная концепция является вариативной и может быть использована с различными агрегатами для сбора, а также системой транспортировки полезного ископаемого на поверхность [7-9].

### Расчет скорости движения добычного агрегата

Для расчета скорости движения сборщика железомарганцевых конкреций (рис. 1, поз. 10) необходимо задаться основными параметрами гидросистемы, а в частности гидронасосом насосной станции и типоразмером гидроцилиндров, участвующих в процессе движения (для особо сложных условий в качестве материала изготовления основных узлов гидросистемы следует принимать металлы, невосприимчивые к воздействию соленой воды). В качестве гидронасоса насосной станции выбирается аксиально-поршневой гидронасос модели RXP50. Данная модель обладает необходимым расходом и имеет рабочие характеристики, которые представлены в таблице 1. В таблице 2 представлены технические характеристики гидроцилиндров, при помощи которых происходит опускание и поднимание рычагов добычного агрегата.

Табл. 1. Характеристики гидронасоса RXP50

Макс. момент на валу при 300 бар [Нм]	620
Максимальная частота вращения, об/мин	2150
Номинальное давление, бар	300
Макс. рабочее давление, бар	350
Рабочий объем, см <sup>3</sup>	220

Табл. 2. Характеристики гидроцилиндра

Диаметр поршня, мм	125
Диаметр штока мм	60
Ход штока мм	620
Расстояние по центрам, мм	1050
Толкающее усилие, кг	24500
Тянущее усилие, кг	18900
Скорость, м/с	0,5
Рабочий объем, л	7,6

Рассмотрим поэтапное движение лап при шагании устройства для сбора железомарганцевых конкреций [10]. Цикл перемещения можно разделить на VII основных фаз.

**Фаза I.** Состояние покоя сборщика железомарганцевых конкреций.

**Фаза II.** На данной фазе осуществляется подъем сборщика, путем подачи жидкости в поршневую полость гидроцилиндров нижних рычагов стрел каждой лапы. Как известно, при равной подаче жидкости в поршневую и штоковую полости средние скорости перемещения подвижной части цилиндра будут определяться (без учета утечек жидкости) из уравнения расхода жидкости, поступающей в цилиндр по формулам

$$v_n = \frac{Q \cdot k_M}{A \cdot B} \cdot k_t; \quad v_{ш} = \frac{Q \cdot k_M}{A \cdot B - a \cdot b} \cdot k_t; \quad (1)$$

где  $v$  – скорость движения при подаче жидкости в поршневую или штоковую полости ( $v_n$  или  $v_{ш}$ );  $A$  и  $B$  – стороны поршня,  $a$  и  $b$  – стороны штока (см. рис. 2);  $k_t$  – коэффициент потери времени на разгон и торможение,  $k_t = 0,75-0,9$ ;  $Q$  – расход жидкости, определяемый аксиально-поршневым регулируемым насосом, рассчитываемый по формуле

$$Q = \frac{V_g \cdot n \cdot \eta_v}{1000} = 381,9 \text{ л / мин} = 0,0064 \text{ м}^3 / \text{с}; \quad (2)$$

где  $V_g$  – рабочий объем, см<sup>3</sup>;  $n$  – частота вращения,  $\eta_v$  – КПД объемный.

Для того, чтобы гидронасос не работал на своих предельных мощностях, введем коэффициент модности  $k_M = 0,85$ , что в реальных условиях будет соответствовать 85% загруженности насоса, тем самым увеличит срок его службы.

Подставив значения в формулу, получим следующие скорости движения поршня при подаче жидкости в поршневую и штоковую полости соответственно

$$v_n = \frac{0,0064 \cdot 0,85}{0,075 \cdot 0,12} \cdot 0,75 = 0,52 \text{ м/с}; \quad v_{ш} = \frac{0,0064 \cdot 0,85}{0,075 \cdot 0,12 - 0,05 \cdot 0,1} \cdot 0,75 = 1,35 \text{ м/с};$$

Общее время для перемещения поршня  $t$  составит величину:

$$t = t_p + t_y + t_T, \quad (3)$$

где  $t_p$ ,  $t_y$ ,  $t_T$  – время, затрачиваемое на разгон, установившееся движение и торможение, определяемое по формулам

$$t_p = \frac{l_p}{v}; \quad t_y = \frac{l_y}{v}; \quad t_T = \frac{l_T}{v}. \quad (4)$$

Подставив каждое значение скоростей  $v_n$  и  $v_{ш}$  в формулу (3), получим следующие показатели времени движения поршня при подаче жидкости в поршневую и штоковую полости:  $t_{In} = 0,9$  с,  $t_{Iш} = 0,4$  с.

В дальнейшем для простоты восприятия последующие расчеты времени движения поршня в каждой фазе шагания сборщика сведем в сводную таблицу 3.

**Фаза III.** Подъем лапы и телескопическое ее раздвижение для последующего шагания вперед.

Скорость перемещения подвижной части цилиндра подъема:

$$v_n = \frac{4 \cdot Q \cdot k_M}{\pi \cdot D^2} \cdot k_t = 0,47 \text{ м/с}; \quad v_{ш} = \frac{4 \cdot Q \cdot k_M}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \cdot k_t = 0,57 \text{ м/с};$$

где  $D$  и  $d$  – диаметры поршня и штока (см. рис. 3);  $k_t$  – коэффициент потери времени на разгон и торможение,  $k_t = 0,9$ .

Время движения поршня при подаче жидкости в поршневую и штоковую полости указаны в таблице 3.

Скорость передвижения подвижной части телескопического раздвижения лапы:

$$v_n = \frac{Q \cdot k_M}{A \cdot B} \cdot k_t = 0,16 \text{ м/с}; \quad v_{ш} = \frac{Q \cdot k_M}{A \cdot B - a \cdot b} \cdot k_t = 0,33 \text{ м/с};$$

где  $A$  и  $B$  – стороны поршня,  $a$  и  $b$  – стороны штока (см. рис. 4).

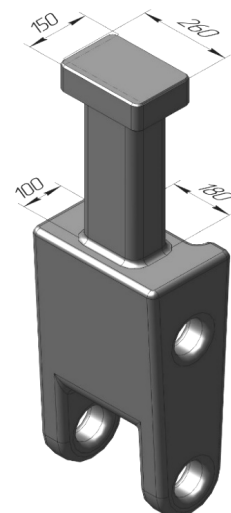
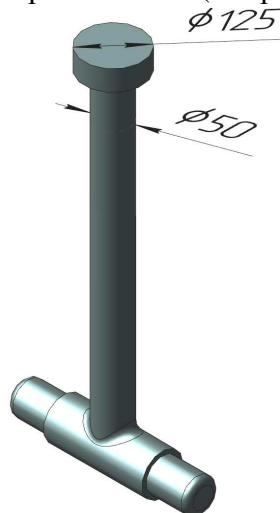
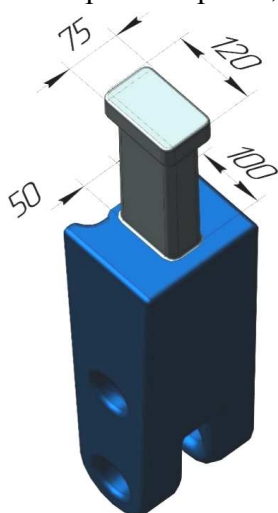


Рис. 3. Габариты поршня    Рис. 3. Диаметры поршня и штока    Рис. 4. Габариты штока

Из таблицы 3 видно, что время подъема рукояти, значительно меньше времени затрачиваемого на телескопическое раздвижение рукояти, следовательно, время протекания данной фазы равняется времени телескопического раздвижения рукояти  $t_{III} = 2,4$  с.

**Фаза IV.** Рукоять 1 (см. рис. 5) опускается на поверхность морского дна, путем подачи рабочей жидкости в штоковую полость гидроцилиндра подъема/опускания, время опускания рукояти приведено в таблице 3.

После того как рукоять 1 коснется поверхности морского дна и тем самым создаст три точки опоры для сборщика железомарганцевых конкреций, начнется подъем рукоятей 2, 3 и 5, время подъема данных рукоятей представлено в таблице 3.

Из вышеописанного следует, что время протекания данной фазы равняется  $t_{IV} = t_{IVu} + t_{IVn} = 0,7c$ .

**Фаза V.** В поршневую часть телескопической рукояти 4 подается рабочая жидкость, тем самым она выдвигается, а в это время в рукояти под номером 1 происходит сдвигание ее подвижных частей. В результате данных действий происходит передвижение сборщика железомарганцевых конкреций. Боковая рукоять 6, находящаяся на поверхности морского дна, осуществляет поворотное движение в противоположную сторону перемещения самого сборщика, а рукоять 3, находящаяся в поднятом состоянии, наоборот закидывается в сторону движения самого сборщика.

Одновременно, во время работы рукоятей 4 и 1 происходит телескопическое раздвижение рукояти под номером 2, которая находится в поднятом состоянии. Данная манипуляция необходима для приведения данной рукояти в дальнейшее рабочее положение на последующих фазах.

Из таблицы 3 видно, что время, затрачиваемое на данной фазе, равняется  $t_V = 2,4c$ .

**Фаза VI.** На данной фазе рукояти под номерами 2, 3 и 5 опускаются на поверхность морского дна, сборщик опирается на поверхность всеми 6 лапами. После того, как вышеуказанные рукояти опустились, начинается подъем рукоятей под номерами 1, 4 и 6, тем самым сборщик имеет три точки опоры (рукояти 2, 3 и 5).

Из вышеописанного следует, что время протекания данной фазы равняется  $t_{VI} = t_{VIu} + t_{VIN} = 0,7c$ .

**Фаза VII.** В поршневую часть телескопической рукояти 5 подается рабочая жидкость, тем самым она выдвигается, а в это время в рукояти под номером 2 происходит сдвигание ее подвижных частей. В результате данных действий происходит передвижение сборщика железомарганцевых конкреций. Боковая рукоять 3, находящаяся на поверхности морского дна, осуществляет поворотное движение в противоположную сторону перемещения самого сборщика, тем самым возвращается в свое изначальное положение состояния покоя. Рукоять 6, находящаяся в поднятом состоянии, перемещается в направлении движения сборщика.

Одновременно во время работы рукоятей 2 и 5 происходит телескопическое раздвижение и сдвигание рукоятей под номерами 1 и 4 соответственно, которые находятся в поднятом состоянии. Данная манипуляция необходима для приведения рукоятей в дальнейшее рабочее положение на последующих фазах.

Время данной фазы равняется  $t_{VII} = 2,4c$ .

**Фаза VIII.** На данной фазе рукояти под номерами 1, 4 и 6 опускаются на поверхность морского дна, сборщик опирается на поверхность всеми 6 лапами. После того, как вышеуказанные рукояти опустились, начинается подъем рукоятей под номерами 2, 3 и 5, тем самым сборщик имеет три точки опоры (рукояти 2, 3 и 5). После чего цикл движения сборщика можно считать окончанным, т.к. последующие манипуляции будут повторять фазу V.

Время данной фазы равняется:  $t_{VIII} = t_{VIIIu} + t_{VIIIn} = 0,7c$ .

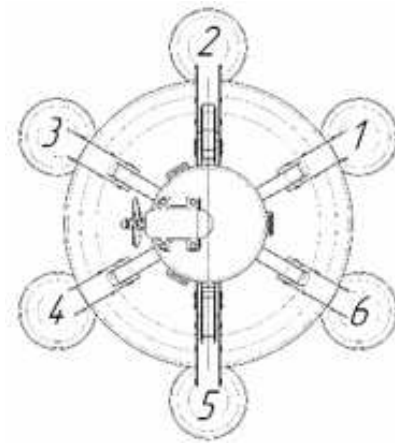


Рис. 5. Вид сверху придонного добычного устройства

Суммирование времени на VI – VII фазах позволяют получить общее время, затрачиваемое на передвижение сборщика железомарганцевых конкреций:

$$t_{\text{общ}} = t_{IV} + t_V + t_{VI} + t_{VII} = 6,2 \text{ с}.$$

Таким образом, получаем, что для передвижения сборщика железомарганцевых конкреций на 1 м необходимо 6,2 секунды, тем самым средняя скорость движения сборщика равняется  $v_{cp} = 0,16$  м/с. Время срабатывание рукоятей будет зависеть от конструкции составляющих элементов и сопротивления их движению в воде. Указанные в статье параметры будут уточняться по результатам экспериментальных исследований.

Табл. 3. Сводная таблица времени перемещения подвижных гидравлических элементов сборщика железомарганцевых конкреций

Фаза	Гидроцилиндр подъема		Телескопическая рукоять	
	$t_n, \text{ с}$	$t_{\text{ш}}, \text{ с}$	$t_n, \text{ с}$	$t_{\text{ш}}, \text{ с}$
I	-	-	-	-
II	-	-	0,7	0,3
III	0,4	0,3	2,4	1,2
IV	0,4	0,3	-	-
V	-	-	2,4	1,2
VI	0,4	0,3	-	-
VII	-	-	2,4	1,2
VIII	0,4	0,3	-	-

### Заключение

Придонное добычное устройство обладает самостоятельным передвижением по морскому дну. Данное обстоятельство позволяет использовать представленное устройство в добычных комплексах с использованием центрального приемного бункера, что значительно сказывается на его производительности, так как исчезает необходимость подъема сборщика на поверхность при заполнении его собственного бункера. Отсутствует волочение приемного бункера придонного добычного устройства при его передвижении по морскому дну. Обладает значительно большей устойчивостью, не склонен к опрокидыванию при возникновении подводных течений действующих перпендикулярно движению придонного добычного устройства. Обладает самой большой скоростью передвижения среди шагоходных сборщиков и большей производительностью среди своих аналогов так, как придонное добычное устройство оснащено шестью вакуумными захватами.

### Список литературы

1. Юнгмейстер Д.А., Королев Р.И., Бородкин Э.О., Лавренко С.А., Вержанский А.П., Насонов М.Ю. Обоснование конструкции технических средств для извлечения глубоководных полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1 (спец. вып. 5). – С. 3-13. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-5-3-13.
2. Каширский А.С. Обоснование параметров кассетного трала для подводной добычи железомарганцевых конкреций: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Каширский Алексей Сергеевич. – Владикавказ, 2021. – 133 с.
3. Serzhan S.L. Determining the rational immersion depth of a mining complex capsule for underwater mining of ferromanganese nodules // Procedia Engineering. 2016, vol. 150, pp. 924-929. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.063.
4. Нурок Г.А., Бруякин Ю.В., Бубис Ю.В. Технология добычи полезных ископаемых со дна озер, морей и океанов. – М.: Недра, 1979. – 381 с.
5. Корогодина А.С., Иванов С.Л., Князькина В.И., Газизуллина А.Р. Геотехнология и горно-обогащительный плавучий комплекс для освоения месторождения «Павловское» // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 124-135. – DOI: 10.26160/2658-3305-2022-15-124-135.
6. Королев Р.И. Обоснование и выбор схемных и конструктивных решений оборудования для подводной добычи кобальтоносных железомарганцевых корок: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Королев Роман Иванович. – СПб., 2022. – 136 с.

7. Патент №186415 РФ. Придонное добычное устройство для сбора железомарганцевых конкреций со дна морей / Д.А. Юнгмейстер, А.П. Исаев, С.Л. Сержан. – Заявка №2018124404 от 03.07.2018; опубл. 21.01.2019. Бюл. №3.
8. Патент №143015 РФ. Устройство сбора конкреций придонного самоходного агрегата / Е.О. Быстров, Ф.В. Вершинский, С.Г. Гнездилов, А.Н. Шубин, Б.К. Ширяев. – Заявка №2013158895 от 30.12.2013; опубл. 10.0.2014, Бюл. №19.
9. Патент №2371580 РФ. Подводный добывающий аппарат и способ его работы / В.И. Беляев. – Заявка №2008104652 от 12.02.2008; опубл. 27.10.2009, Бюл. №30.
10. Бородкин Э.О., Королев Р.И. Устройство для сбора железомарганцевых конкреций с механизмом шагания // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019. Сборник научных трудов. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. – С. 69-76.

#### References

1. Yungmeister D.A., Korolev R.I., Borodkin E.O., Lavrenko S.A., Verzhansky A.P., Nasonov M.Y. Justification of design of technical means for extraction of deep minerals // Mountain Information and Analytical Bulletin. 2020, no. 1 (spec. iss.5), pp. 3-13. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-5-3-13.
2. Kashirsky A.S. Justification of the parameters of a cassette trawl for underwater mining of ferromanganese nodules: Diss. ... cand. of tech. sc.: 05.05.06 / Kashirsky Alexey Sergeevich. – Vladikavkaz, 2021. – 133 p.
3. Serzhan S.L. Determining the rational immersion depth of a mining complex capsule for underwater mining of ferromanganese nodules // Procedia Engineering. 2016, vol. 150, pp. 924-929. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.063.
4. Nurok G.A., Bruyakin Yu.V., Bubis Yu.V. Technology of mining of minerals from the bottom of lakes, seas and oceans. – М.: Nedra, 1979. – 381 p.
5. Korogodin A.S., Ivanov S.L., Knyazkina V.I., Gazizullina A.R. Geotechnology and mining and processing floating complex for development of Pavlovskoye deposit // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 15, pp. 124-135. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-15-124-135.
6. Korolev R.I. Substantiation and choice of schematic and constructive solutions of equipment for underwater extraction of cobalt-rich ferromanganese crusts: Diss. ... cand. of tech. sc.: 05.05.06 / Korolev Roman Ivanovich. – SPb., 2022. – 136 p.
7. Patent No. 186415 RU. Bottom extraction device for collecting ferromanganese nodules from the seabed / D.A. Yungmeister, A.P. Isaev, S.L. Serzhan. – Appl. No. 2018124404 from 03.07.2018; publ. 21.01.2019, Bull. No. 3.
8. Patent No. 143015 RU. Nodule collection device of a bottom self-propelled unit / E.O. Bystrov, F.V. Vershinsky, S.G. Gnezdilov, A.N. Shubin, B.K. Shiryaev. – Appl. No. 2013158895 from 30.12.2013; publ. 10.0.2014, Bull. No. 19.
9. Patent № 2371580 RU. Underwater mining apparatus and method of its operation / V.I. Belyaev – Appl. No. 2008104652 from 12.02.2008; publ. 27.10.2009, Bull. No. 30.
10. Borodkin E.O., Korolev R.I. Device for collecting ferromanganese nodules with a stepping mechanism // Innovations and prospects for the development of mining engineering and electromechanics: IPDME-2019. Collection of scientific papers. – SPb.: Saint-Petersburg Mining University, 2019. – P. 69-76

#### Сведения об авторах:

#### Information about authors:

<b>Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич</b> – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Машиностроения	<b>Yungmeister Dmitriy Alekseevich</b> - doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Mechanical Engineering
<b>Исаев Алексей Игоревич</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры Начертательной геометрии и графики	<b>Isaev Alexey Igorevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of Department of descriptive geometry and graphics
<b>Смоленский Максим Павлович</b> – аспирант	<b>Smolenskii Maxim Pavlovich</b> – postgraduate student
<b>Беляев Андрей Викторович</b> – аспирант	<b>Belyaev Andrey Viktorovich</b> – postgraduate student
ivanchenko97@mail.ru	

Получена 17.12.2022