

## КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ СРЕДСТВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ДЛЯ ПРИДОННЫХ ДОБЫЧНЫХ МАШИН

Д.А. Юнгмейстер<sup>1</sup>, С.Л. Сержан<sup>1</sup>, Р.И. Королев<sup>2</sup>, А.И. Исаев<sup>1</sup>, Е.В. Федоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: s255014@stud.spmi.ru

<sup>2</sup> ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** Рассмотрены требования, предъявляемые к двигателям придонных добычных машин для разработки глубоководных месторождений таких уникальных полезных ископаемых, как железомарганцевые конкреции, глубоководные полиметаллические сульфиды, кобальт-марганцевые корки. Основным фактором является минимальное воздействие на подводную экосистему. На основе уже существующих опытных образцов добычных машин и патентов был проведен анализ преимуществ и недостатков существующих концептуальных механизмов передвижения горных машин, в результате которого было определено, что наиболее перспективными являются машины, которые не контактируют с поверхностью морского дна, однако такие машины имеют ряд недостатков. Не менее перспективными на сегодняшний день являются машины шагающие и на гусеничном ходу. Представлены упрощенные формулы для определения требуемого минимального тягового усилия при движении подводных добычных машин; были получены упрощенные формулы для определения скорости передвижения, что также наглядно указывает на преимущество плавающих добычных машин. Согласно полученным графическим зависимостям, важную роль в производительности добычных машин играет комплекс параметров, таких как скорость перемещения, габаритные размеры, вес, форма машины. Описан комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых, разработанный сотрудниками кафедры машиностроения СПбГУ с различными вариантами конфигурации комплекса в зависимости от вида полезного ископаемого, а также плотности его распределения.

**Ключевые слова:** глубоководная добыча, разработка глубоководных месторождений, придонные добычные машины, двигатели добычных машин, железомарганцевые конкреции, глубоководные полиметаллические сульфиды, кобальт-марганцевые корки, комплекс для разработки полезных ископаемых.

**Для цитирования:** Юнгмейстер Д. А., Сержан С. Л., Королев Р. И., Исаев А. И., Федоров Е. В. Конструкции и параметры средств передвижения для придонных добычных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 145–158. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_21\_0\_145.

### Designs and parameters of vehicles for bottom mining machines

D.A. Yungmeister<sup>1</sup>, S.L. Serzhan<sup>1</sup>, I.R. Korolev<sup>2</sup>, A.I. Isaev<sup>1</sup>, E.V. Fedorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,  
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: s255014@stud.spmi.ru

<sup>2</sup> Prostech Engineering, Saint-Petersburg, Russia

---

**Abstract:** The article discusses the requirements for propellers of bottom mining machines for the development of deep-sea deposits of such unique minerals as ferromanganese nodules, deep-sea polymetallic sulfides, cobalt-manganese crusts. The main factor is the minimal impact on the underwater ecosystem. Based on existing prototypes of mining machines and patents, an analysis of the advantages and disadvantages of existing conceptual mechanisms for the movement of mining machines was carried out, as a result of which it was determined that the most promising machines are those that do not contact the surface of the seabed, but such machines have a number of disadvantages. No less promising today are walking and tracked vehicles. The paper presents simplified formulas for determining the required minimum traction force when moving underwater mining machines, and simplified formulas for determining the speed of movement were obtained, which also clearly indicates the advantage of floating mining machines. According to the obtained graphical dependencies, a set of parameters plays an important role in the productivity of mining machines, including the speed of movement, overall dimensions, weight, and shape of the machine. The article also describes a complex for the extraction of minerals dispersed along the seabed, developed by the staff of the Department of Mechanical Engineering of St. Petersburg State University with various configuration options for the complex depending on the type of mineral, as well as the density of its distribution.

**Key words:** deep-sea mining, development of deep-sea deposits, bottom mining machines, propellers of mining machines, ferromanganese nodules, deep-sea polymetallic sulfides, cobalt-manganese crusts, a complex for the development of minerals.

**For citation:** Yungmeister D. A., Serzhan S. L., Korolev I. R., Isaev A. L., Fedorov E. V. Designs and parameters of vehicles for bottom mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1):145-158. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_21\_0\_145.

---

## Введение

Одним из этапов развития горной отрасли является промышленная разработка уникальных месторождений полезных ископаемых (ПИ) [1]. Среди них — глубоководные твердые полезные ископаемые (ГТПИ) [2], а именно:

- железомарганцевые конкреции (ЖМК);
- глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС);
- кобальт-марганцевые корки (КМК).

Указанные ГТПИ залегают в морских глубинах Мирового океана и обладают огромным ресурсным потенциалом [3, 4]. Однако добыча твердых полезных ископаемых (ТПИ) со дна Мирового океана осложнена большой глубиной их залегания (до 6000 м), а также необходимостью индивидуального

подхода к каждому виду ГТПИ. Уникальность условий залегания твердых полезных ископаемых на дне Мирового океана [5] поднимают вопрос о создании оборудования, которое сможет работать непрерывно, а также обеспечить требуемую производительность. Создание технологий для глубоководной добычи началось с 70-х годов прошлого столетия. На сегодняшний день у множества компаний существуют прототипы добычных машин [6]. Некоторые из них уже прошли испытания [7, 8].

Стоит отметить, что не существует единого технического решения для разработки всех трех видов ГТПИ. Также нет ясности в том, как глубоководная добыча повлияет на подводные флору и фауну. Типовой добычной комплекс для разработки глубоководных место-

рождений должен включать в себя обслуживающее судно, на котором будет осуществляться обслуживание техники, размещаться источник питания для подводного комплекса, экипаж и т.д.; систему для транспортирования добываемого ПИ на поверхность; подводную горную машину, осуществляющую подготавливательные/добычные работы; судно-бункер для приема ПИ и его дальнейшего транспортирования.

В общем виде горные машины обладают схожей структурой и имеют такие компоненты, как система перемещения и подачи, система управления, исполнительный орган, энергетическая установка и трансмиссия [9].

Стоит отметить, что благодаря цифровизации [10–12] и внедрению современных технологий в горную промышленность управление машин возможно осуществлять дистанционно [13]. Данный фактор является существенным, поскольку из-за больших глубин залегания присутствие человека в месте разработки ГТПИ является не только труднореализуемым, но и опасным для его жизни.

Одним из самых важных вопросов является оценка экологического вреда для морской экосистемы [14–16]. Разработка месторождений рассредоточенных ПИ неизбежно нанесет ущерб месту обитания различных морских существ [17–19].

Немаловажным является требование надежности, предъявляемое к глубоководным добычным машинам [20]. Выход машин из строя приведет не только к непредвиденным затратам, но и к серьезным экологическим нарушениям.

Особого внимания требует выбор движителя сборочной машины. Исходя из условий залегания ЖМК, КМК и ГПС, можно сделать вывод, что добычная машина должна перемещаться с заданной скоростью с целью обеспечения

потребной производительности. Стоит отметить, что движитель должен обеспечивать высокую проходимость при передвижении. Месторождения ГТПИ исключают наличие инженерных сооружений для передвижения машин, что усложняет вопрос проектирования подводной горной машины.

Кроме того, механизм передвижения должен обеспечивать проходимость как на больших уклонах, так и на пологой поверхности, нанося при этом минимальный ущерб морскому дну. Таким образом, движитель сборочной машины должен отвечать как техническим, так и экологическим требованиям.

Цель статьи — определение преимуществ и недостатков существующих на сегодняшний день движителей для придонных добычных машин на основе изучения уже существующих прототипов и полезных моделей.

### **Известные технические решения для передвижения по морскому дну**

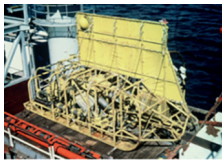




По типу перемещения по морскому дну существующие добычные машины можно разделить на три группы: буксируемые, самоходные, шагающие. К самоходным типам движителей относятся гусеничный, плавающие машины и машины с движителем на основе спирали Архимеда (шнековый). Примеры оборудования с различными механизмами перемещения представлены в табл. 1.

В табл. 2 приведены преимущества и недостатки каждого из указанных движителей.

Наиболее безвредными для подводной системы являются плавающие машины. Данный тип машин позволяет исключить взаимодействие с морским дном, тем самым снизить воздействие на подводные флору и фауну. Однако применение такого движителя не сможет обеспечить высокую грузоподъем-

Таблица 1

**Варианты способа передвижения добычных машин [составлено авторами]**  
**Options for the movement of mining vehicles [Compiled by the authors]**

Механизм передвижения	Графическая иллюстрация опытного образца	Тип ГТПИ	Компания
Буксируемый [6]		ЖМК	ОМІ (Международный)
Шнековый [6]		ЖМК	ОМСО (США)
Гусеничный [21, 22]		ЖМК	GSR (Бельгия)
Шагающий [23]		ЖМК	Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (Россия)
Плавающий [24]		ЖМК	ООО «ГИКО» (Россия)

ность машины, что потребует большого парка техники.

Наибольшее воздействие на дно будут оказывать машины буксируемые, а также со шнековым движителем. Стоит отметить, что для первого вида также требуется наличие буксируемого судна, что усложняет задачу внедрением дополнительной техники.

В случае машин, контактирующих с дном, выбор механизма передвижения определяется по нескольким критериям:

- максимально преодолимый уклон;
- давление на морское дно;
- вес машины;
- габаритные размеры движителя;
- сложность конструкции, определяемая количеством уникальных сборочных единиц, а также сложностью их изготовления;
- коэффициент готовности.

На производительность сборочных машин будут влиять следующие факторы:

Таблица 2

**Анализ возможных механизмов передвижения по морскому дну [составлено авторами]**  
**Analysis of possible mechanisms of movement on the seabed [Compiled by the authors]**

Тип перемещения	Преимущества	Недостатки
Буксируемый	Простота конструкции	Низкие производительность и маневренность, требуется дополнительное судно для буксировки
Гусеничный	Большое тяговое усилие, большая грузоподъемность, незначительное нарушение морского дна, маневренность, возможность преодолевать большие уклоны	Высокая энергоемкость, проскальзывание
Плавающий	Простота конструкции, возможность перемещения без контакта с морским дном	Сравнительно малое тяговое усилие, сложность конструкции, высокая энергоемкость, низкая эффективность
Шнековый	Простота конструкции и хорошая проходимость по морскому дну	Скольжение, низкая несущая способность, значительное нарушение морского дна
Шагающий [23]	Высокая маневренность, незначительное нарушение морского дна	Низкая скорость перемещения, сложность конструкции

- производительность комплекса — данный пункт непосредственно задает требования к скорости перемещения [25];
- глубина погружения — с увеличением погружения возрастает плотность воды, что в свою очередь увеличит сопротивление движению машины [26];
- габариты машины — добычные машины не должны обладать большими габаритами, что позволит снизить лобовое сопротивление движению машины;
- мощность выбранного двигателя — из-за ограничений в габаритах возникает вопрос о грамотном подборе оборудования.

Первый из указанных параметров напрямую определяет количество единиц оборудования, способное обеспечить требуемые объемы добычи. Так, например, разрабатываемый ООО «ГИКО» «рой» роботов-сборщиков включает в себя более 500 шт. [24].

Производительность сборочной машины  $Q$  при сборе полезных ископае-

мых (на примере ЖМК) определяется по формуле

$$Q = B \cdot v \cdot q \cdot K_n \cdot \eta, \quad (1)$$

где  $B$  — ширина захвата исполнительного органа;  $v$  — скорость перемещения сборочной машины;  $q$  — плотность залегания ГТПИ;  $K_n$  — коэффициент полноты сбора конкреций;  $\eta$  — коэффициент разубоживания [27].

Формула наглядно показывает, что движитель сборочной машины должен обеспечивать возможность перемещаться с большой скоростью для поля с малой плотностью распределения ПИ. На рис. 1 показана графическая зависимость производительности от скорости передвижения.

Стоит отметить, что данные показатели были получены при условии отсутствия потерь и разубоживания ( $K_n = 1$ ,  $\eta = 1$ ). Значения производительности были рассчитаны при  $B = 2,5$  м.

Из графика следует вывод о важности предусмотрения вариативности ско-

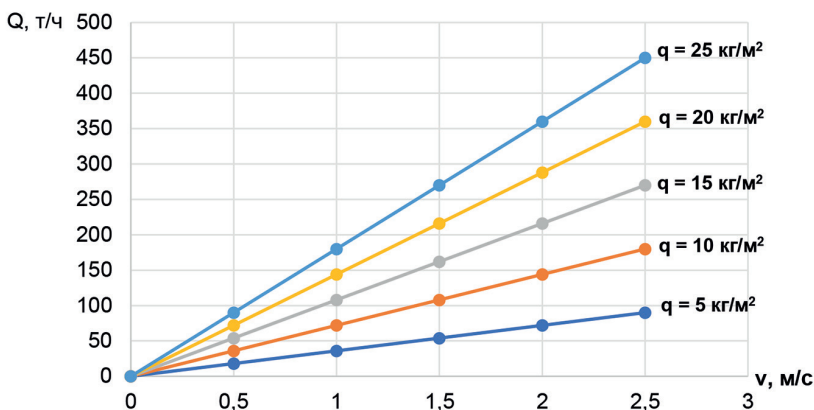


Рис. 1. График зависимости производительности подводной добычной машины от скорости ее передвижения [составлено авторами]

Fig. 1. Graph of the dependence of the performance of an underwater mining machine on the speed of its movement [Compiled by the authors]

рости перемещения горной машины в зависимости от разрабатываемой области месторождения.

Для обеспечения возможности машины передвигаться по морскому дну важно предоставить движителю достаточную силу тяги. В общем виде тяговое усилие, необходимое для движения машины, имеет вид

$$P = P_f \pm P_i + P_w + P_j \quad (2)$$

где  $P_f$  — сила на преодоление сил трения;  $P_i$  — усилие для преодоления уклона;  $P_w$  — сопротивление воздуха (воды);  $P_j$  — сила сопротивления разгону (приведенная сила инерции вращающихся масс). Для машин, контактирующих с морским дном, для ориентировочного расчета допускается, что  $P_j = 0$ . Тогда формула принимает вид

$$P = P_f \pm P_i + P_w \quad (3)$$

В случае плавающих машин формула (1) принимает следующий вид:

$$P = P_w \quad (4)$$

В случае буксируемых машин необходимо учитывать усилие натяжения троса  $P_{кр}$ :

$$P = P_f \pm P_i + P_w + P_{кр} \quad (5)$$

Для шагающих машин в упрощенном виде минимальное тяговое усилие определяется следующим образом:

$$P = P_f + P_w \quad (6)$$

Гидродинамическое сопротивление определяется по формуле

$$P_w = c_x \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (7)$$

где  $c_x$  — безразмерный коэффициент сопротивления формы;  $S$  — площадь смоченной поверхности;  $\rho$  — плотность воды.

Скорость перемещения для подводных машин  $v$  в общем виде определяется следующим образом:

$$v^2 = \sqrt{\frac{2 \cdot P_w}{\rho \cdot c_x \cdot S}} \quad (8)$$

Однако данная формула не учитывает сопротивления, возникающие при контакте с морским дном. При наличии сил трения формула приобретает вид

$$v^2 = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_w - f \cdot G)}{\rho \cdot c_x \cdot S}}, \quad (9)$$

где  $f$  — коэффициент трения;  $G$  — вес машины.

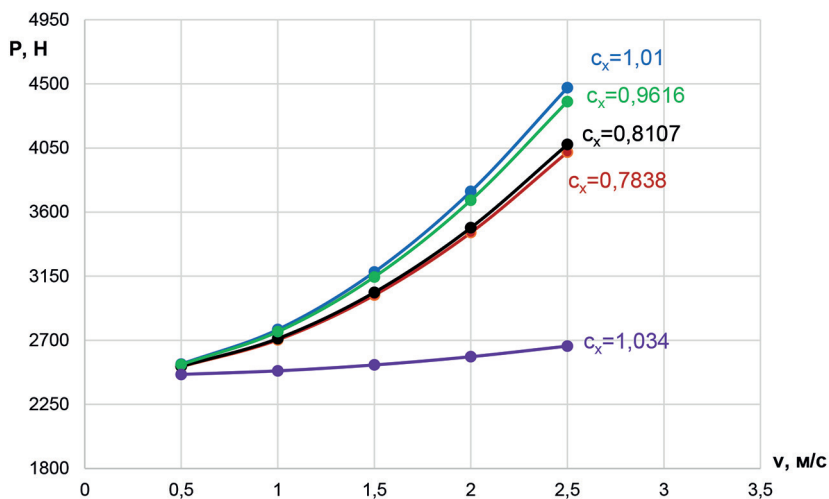


Рис. 2. График зависимости тягового усилия самоходных машин от скорости передвижения при различном коэффициенте  $c_x$  [составлено авторами]

Fig. 2. Graph of the dependence of the traction force of self-propelled vehicles on the speed of movement with a different coefficient  $c_x$  [Compiled by the authors]

Из формул следует, что наименее энергоемкими являются плавающие машины. В остальных случаях требуется уточнение габаритов и массы сборочных машин.

Применение гусеничных машин допускается в случае разработки месторождений ГПС и КМК, так как данные месторождения подразумевают вскрышные работы, что уже нанесет вред подводному ареалу. Для разработки месторождений ЖМК требуется анализ проседания гусениц в ил, а также проведение оценки нарушения морского дна.

Определяющим фактором при проектировании машины являются ее габариты, на что указывает формула (7). В случае если машина будет иметь сравнительно малые габаритные размеры, возможно перемещение с большой скоростью. На рис. 2 представлено, как скорость передвижения влияет на значение требуемого тягового усилия.

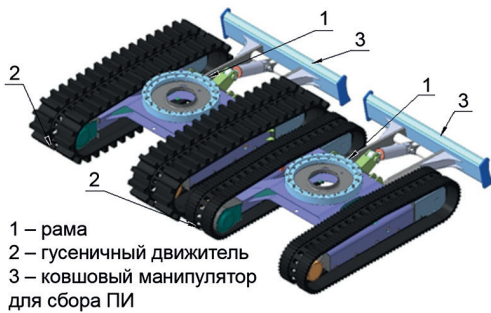
Из последнего графика напрашивается вывод о том, что большую значимость играет формфактор проектируемой машины. Также стоит отметить, что

при малых скоростях тип исполнения машины не влияет на минимально требуемое тяговое усилие, но при увеличении скорости разница существенна. Поэтому при проектировании следует стремиться к как можно меньшему значению коэффициента  $c_x$ .

Однако в указанных ранее формулах не учитываются ограничения, накладываемые на добычу глубоководных полезных ископаемых [28, 29]. Например, высокая скорость передвижения машины может увеличить потери при сборе ЖМК. При разработке месторождений КМК или ГПС перед сбором требуется проведение вскрышных работ. В зависимости от способа разработки, может потребоваться куда большая мощность, чем при сборе ПИ.

### Возможные технологические решения

На сегодняшний день существует большое количество машин на гусеничном ходу [30, 31]. Данный факт указывает на необходимость разработки более простых средств передвижения, при-



1 – рама  
2 – гусеничный движитель  
3 – ковшовый манипулятор для сбора ПИ

Рис. 3. Модернизированный вариант платформы морского экскаватора ООО «ГИКО» [составлено авторами]

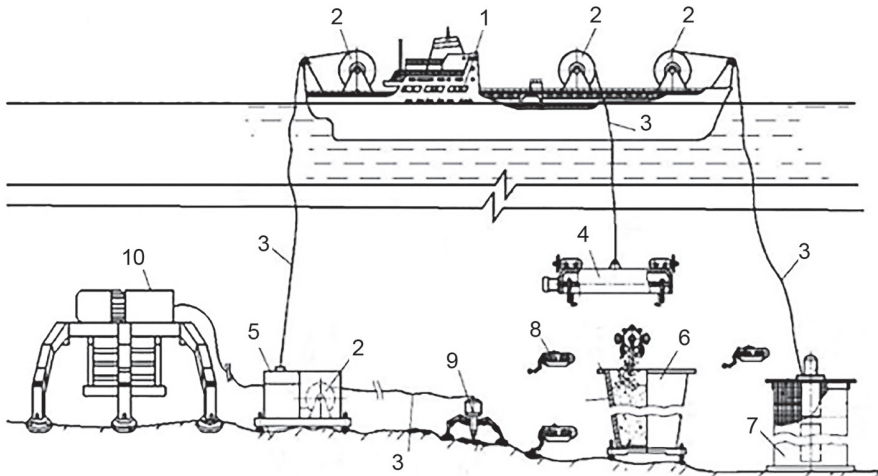
Fig. 3. Upgraded platform of the marine excavator NYCO [Compiled by the authors]

менение которых возможно при малых глубинах, а также при отсутствии риска экологических нарушений.

Сотрудниками СПГУ и ООО «ГИКО» была произведена модернизация гусеничной каретки, которая может перемещаться на глубинах до 50 м [отчет о научно-исследовательской работе № 20122 хд]. На рис. 3 представлена модель модернизированной гусеничной каретки.

Опорное давление 17,6 МПа. Данное исполнение каретки обеспечивает не только снижение давления на морское дно, но и снижение металлоемкости конструкции, а также увеличение межосевого расстояния между гусеницами. Испытания позволяют определить слабые места конструкции, что поможет дальнейшей разработке машины, способной работать на больших глубинах. Управление машиной осуществляется дистанционно с базового судна. Применение такой гусеничной платформы возможно при сборе ЖМК в акватории Финского залива.

Стоит отметить, что, в зависимости от конфигурации комплекса, тип движителя горной машины может быть различным для разных типов выполняемых задач [32]. Одним из таких примеров является комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых, разработанный сотрудниками кафедры машиностроения СПГУ [33]. На рис. 4 представлена возможная компоновка комплекса для разработки



1 – базовое судно, 2 – лебедка, 3 – кабель-трос для спускоподъемных операций, 4 – рама с ходовым винтом и подруливающими устройствами, 5 – распределительное устройство, 6 – бункер для сбора ЖМК/КМК, 7 – бокс-ангар с зарядной станцией, 8 – роботы-сборщики (разработка ООО «ГИКО»), 9 – шагающие роботы для сбора породы, 10 – бункер на шагающем портале

Рис. 4. Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых [33]

Fig. 4. Complex for extraction of minerals dispersed on the seabed [33]

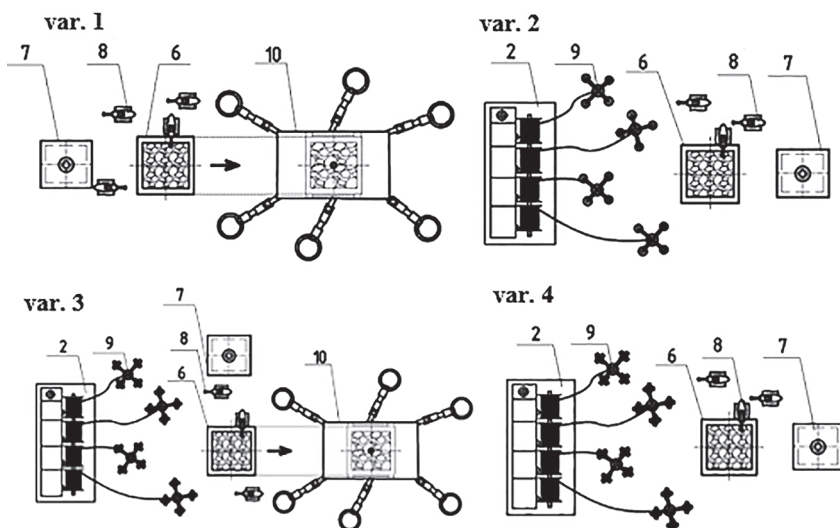


Рис. 5. Варианты добычных комплексов в зависимости от плотности распределения ЖМК/КМК [33]  
 Fig. 5. Variants of mining complexes depending on the density of the PMN/CFC distribution [33]

месторождения ЖМК. Конфигурация представленного комплекса может варьироваться в зависимости от плотности распределения и вида ГТПИ:

- 1-й вариант: при малых значениях плотности распределения ЖМК (до  $10 \text{ кг/м}^2$ ) используются следующие агрегаты: бокс-ангар 7 с автономными роботами-сборщиками 8, шагающий ПА-портал для перестановки бункера 10, бункер для сбора ЖМК 6;

- 2-й вариант: при больших значениях плотности залегания (свыше  $10 \text{ кг/м}^2$ ) применяется станция 2 с шагающими роботами-сборщиками, оснащенными камерами разряжения 9, бункер для сбора ЖМК 6, бокс-ангар 7 с автономными роботами сборщиками ООО «ГИКО» 8;

- 3-й вариант: данный вариант предлагается для разработки месторождений КМК с низкой плотностью распределения корок (до  $10 \text{ кг/м}^2$ ) — станция 2 с шагающими роботами-сборщиками 9, исполнительный орган которых выполнен в виде грейфера с ударником, бокс-ангар 7 с роботами-сборщиками 8, шагающий ПА-портал для перестановки бункера 10;

- 4-й вариант также предназначен для разработки месторождений КМК, но с более высокой плотностью распределения: станция 2 с шагающими роботами-сборщиками 9, исполнительный орган которых выполнен в виде грейфера с ударником, бокс-ангар 7 с роботами-сборщиками 8.

Графическое представление описанных конфигураций для различных типов месторождений представлено на рис. 5. Данный комплекс наглядно показывает возможность применения различных способов передвижения при разработке глубоководных месторождений ГТПИ.

Представленная модель комплекса и оборудования была разработана с целью меньшего экологического воздействия на морскую акваторию. Однако данные разработки требуют испытаний с дальнейшим анализом работы опытных образцов.

### Заклучение

Таким образом, освоение глубоководных месторождений уникальных полезных ископаемых требует создания пе-

редовых технических решений. Перед инженерами стоит задача в создании машин, способных безотказно работать на протяжении продолжительного периода времени на больших глубинах под водой. Одним из важнейших вопросов остается сохранение подводной экосистемы при разработке ГТПИ. Особо внимания заслуживает определение способа передвижения добычных машин по дну. Конструкция машин должна обеспечивать проходимость по условиям бездорожья и преодоление уклонов с возможностью вариативности скорости. Немаловажным фактором является и грузоподъемность машины.

Из проведенного анализа был сделан вывод, что наиболее перспективным по способу передвижения по морскому дну является плавающий тип машин. При неких допущениях с точки зрения нару-

шения рельефа морского дна возможно применение шагающих машин, а также машин на гусеничном ходу.

На сегодняшний день существует большое количество опытных образцов для разработки глубоководных месторождений. Множество компаний уже имеют опытные образцы добычных машин, однако сейчас они на этапе тестирования, что говорит о неготовности мира к началу освоения глубоководных месторождений.

Разработанные технологии СПГУ и ООО «ГИКО» могут послужить прототипами при разработке комплексов для добычи рассредоточенных глубоководных ПИ. В настоящее время разрабатывается техническая документация для создания опытного образца, который будет проходить испытания в акватории Финского залива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пашкевич Н. В., Хлопонина В. С., Поздняков Н. А., Аверичева А. А. Анализ проблем воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных стратегических полезных ископаемых // Записки Горного института. — 2024. — Т. 270. — С. 1004—1023.
2. Лаптева А. М., Мустафа Т. С., Смольникова А. В., Чернова А. Д. Оценка перспектив рационального освоения ресурсов железомарганцевых конкреций дна Мирового океана в контексте эволюции мировых рынков меди, никеля, кобальта и марганца // Руды и металлы. — 2021. — № 1. — С. 6—25. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10001.
3. Hein J. R., Mizell K., Koschinsky A., Conrad T. A. Deep-ocean mineral applications: Comparison with land-based resources // Ore Geology Reviews. 2013, vol. 51, pp. 1—14. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2012.12.001.
4. Балашова Е. С., Фрумен А. И. Концептуальные проблемы организации рентабельной разработки и добычи железомарганцевых конкреций со дна мирового океана // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2022. — № 3 (401). — С. 145—151. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-145-151.
5. Юбко В. М., Пономарева И. Н., Лыгина Т. И. Геологоразведочные работы на месторождении железомарганцевых конкреций в зоне Клариян-Клиппертон Тихого океана: история и результаты исследований // Океанологические исследования. — 2023. — Т. 51. — № 4. — С. 90—134. DOI: 10.29006/1564-2291.
6. 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, pp. 1083—1115. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.
7. Zhang Q., Chen X., Luan L., Sha F., Liu X. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives // Earth Energy Science. 2025, vol. 1, no. 1, pp. 65—84. DOI: 10.1016/j.ees.2024.08.002.
8. 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.
9. Мирошниченко А. Н. Основы теории автомобиля и трактора. — Томск, 2014. — 490 с.

10. Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 895–908. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.

11. Zhukovskiy Y., Buldysko A., Revin I. Induction motor bearing fault diagnosis based on singular value decomposition of the stator current // Energies. 2023, vol. 16, no. 8, article 3303. DOI: 10.3390/en16083303.

12. Фоломкин А. И., Чупин С. А., Трубецкая О. В., Шарок В. В. Разработка программы-тренажера на базе нейронных сетевых технологий для развития пространственного мышления студентов // Перспективы науки и образования. — 2022. — № 3 (57). — С. 582–602. DOI: 10.32744/pse.2022.3.34.

13. Stoianova A. D., Trofimets V. Y., Stoianova O. V., Matrokhina K. V. Structural model of decision support system for sustainable development of oil and gas companies // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2025, vol. 38, no. 04, pp. 701–709. DOI: 10.5829/IJE.2025.38.04A.03.

14. Tilot V., Fouchault L., de Grissac A. J., Mallefet J., Navas J. M. Multilevel assessment and options for the management of cumulative impacts on pelagic ecosystems in the North-Eastern Tropical Pacific Ocean / Deep-Sea Mining and the Water Column: Advances, Monitoring and Related Issues. Cham: Springer Nature Switzerland. 2024, pp. 415–473. DOI: 10.1007/978-3-031-59060-3\_13.

15. Sharma R., Smith S. Deep-sea mining and the environment: an introduction / Environmental issues of deep-sea mining: impacts, consequences and policy perspectives. 2019, pp. 3–22. DOI: 10.1007/978-3-030-12696-4\_1.

16. Sitlhou L., Chakraborty P. Comparing deep-sea polymetallic nodule mining technologies and evaluating their probable impacts on deep-sea pollution // Marine Pollution Bulletin. 2024, vol. 206, article 116762. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116762.

17. Katona S., Paulikas D., Stone G. S. Ethical opportunities in deep-sea collection of polymetallic nodules from the Clarion-Clipperton Zone // Integrated Environmental Assessment and Management. 2022, vol. 18, no. 3, pp. 634–654. DOI: 10.1002/ieam.4554.

18. Priede I. G., Muller-Karger F. E., Niedzielski T. Drivers of biomass and biodiversity of non-chemosynthetic benthic fauna of the Mid-Atlantic Ridge in the North Atlantic // Frontiers in Marine Science. 2022, vol. 9, article 866654. DOI: 10.3389/fmars.2022.866654.

19. Amon D. J., Gollner S., Morato T., etc. Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining // Marine Policy. 2022, vol. 138, article 105006. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105006.

20. Глазьев М. В., Бажин В. Ю., Глазьева И. А. Оценка влияния добавки микрокремнезема на свойства огнеупорных материалов для сталеразливочных ковшей // Черные металлы. — 2025. — № 6. — С. 22–28. DOI: 10.17580/chm.2025.06.04.

21. Atmanand M. A., Ramadass G. A. Concepts of deep-sea mining technologies / Deep-sea mining: Resource potential, technical and environmental considerations. Cham: Springer International Publishing. 2017, pp. 305–343. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0\_10.

22. Janarthanan C., Muruganandhan R., Gopkumar K. Design and multi-body dynamic analysis of inline and offset track configuration in deep-sea mining vehicles for enhanced traction in soft seabed // Journal of Terramechanics. 2024, vol. 116, article 100999. DOI: 10.1016/j.jterra.2024.100999.

23. Юнгмейстер Д. А., Смоленский М. П., Сержан С. Л., Уразбахтин Р. Ю. Параметры шагающего устройства для добычи полезных ископаемых, рассредоточенных по морскому дну // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 487–502. DOI: 10.21177/19984502-2024-16-2-487-502.

24. Афанасьев А. А., Литовко С. С., Григорчук А. В. Добыча железомарганцевых конкреций с применением «роя» роботов-сборщиков / Конференция «Освоение минеральных ресурсов Мирового океана»: сборник тезисов. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2024. — 81 с.

25. Шишлянников Д. И., Зверев В. Ю., Муравский А. К., Звонарев И. Е., Королев И. А. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 9. — С. 116–124. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124.

26. Бахтизин Р. Н., Зарипов Р. М., Коробков Г. Е., Масалимов Р. Б. Оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода // Записки Горного института. — 2020. — Т. 242. — С. 160–168. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.160.

27. Рахутин М. Г., Каширский А. С. Расчет и прогноз производительности оборудования для подводной добычи твердых полезных ископаемых // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2020. — № 4. — С. 39–45. DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-39-45.

28. Маховиков Б. С., Шорников В. В. Перспективы освоения подводных месторождений железомарганцевых конкреций морского дна // Записки Горного института. — 2004. — Т. 157. — С. 190–193.

29. Botyan E. Y., Lavrenko S. A., Pushkarev A. E. Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems // International Journal of Engineering. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2268–2275. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.12.

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

31. 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.

32. Хамидов О. У., Шибанов Д. А. Техническое обслуживание и ремонт карьерных экскаваторов по регламенту с учетом фактических условий и режимов их эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 12-3. — С. 152–167. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_123\_0\_152.

33. Юнгмейстер Д. А., Шпенст В. А., Григорчук А. В., Исаев А. И., Смоленский М. П. Патент РФ № 2788227 РФ. Комплекс для добычи рассредоточенных по морскому дну полезных ископаемых. 2023. Бюл. № 2. **ПАТЕНТ**

## REFERENCES

1. Pashkevich N. V., Khloponina V. S., Pozdnyakov N. A., Avericheva A. A. Analysing the problems of reproducing the mineral resource base of scarce strategic minerals. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 270, pp. 1004–1023. [In Russ].

2. Lapteva A. M., Mustafa T. S., Smol'nikova A. V., Chernova A. D. Assessment of potential efficient development of the World ocean ferromanganese nodules in the context of global copper, nickel, cobalt and manganese market evolution. *Ores and Metals*. 2021, no. 1, pp. 6–25. [In Russ]. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10001.

3. Hein J. R., Mizell K., Koschinsky A., Conrad T. A. Deep-ocean mineral applications: Comparison with land-based resources. *Ore Geology Reviews*. 2013, vol. 51, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2012.12.001.

4. Balashova E. S., Frumen A. I. Conceptual problems of the organization of cost-effective development and extraction of ferromanganese nodules from the bottom of the World Ocean. *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2022, no. 3 (401), pp. 145–151. [In Russ]. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-145-151.

5. Yubko V. M., Ponomareva I. N., Lygina T. I. Geological exploration works at the deposit of poly-metallic 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.

6. 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, pp. 1083–1115. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.07.007.

7. Zhang Q., Chen X., Luan L., Sha F., Liu X. Technology and equipment of deep-sea mining: State of the art and perspectives. *Earth Energy Science*. 2025, vol. 1, no. 1, pp. 65–84. DOI: 10.1016/j.ees.2024.08.002.

8. 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.

9. Miroshnichenko A. N. *Osnovy teorii avtomobilya i traktora* [Fundamentals of the theory of the automobile and tractor], Tomsk, 2014, 490 p.

10. Zhukovskiy Yu. L., Suslikov P. K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 895 – 908. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908.
11. Zhukovskiy Y., Buldysko A., Revin I. Induction motor bearing fault diagnosis based on singular value decomposition of the stator current. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 8, article 3303. DOI: 10.3390/en16083303.
12. Folomkin A. I., Chupin S. A., Trubetskaya O. V., Sharok V. V. Development of the trainer program based on neural network technologies for development of spatial thinking of students. *Perspectives of Science and Education*. 2022, no. 3 (57), pp. 582 – 602. [In Russ]. DOI: 10.32744/pse.2022.3.34.
13. Stoianova A. D., Trofimets V. Y., Stoianova O. V., Matrokhina K. V. Structural Model of decision support system for sustainable development of oil and gas companies. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2025, vol. 38, no. 04, pp. 701 – 709. DOI: 10.5829/IJE.2025.38.04A.03.
14. Tilot V., Fouchault L., de Grissac A. J., Mallefet J., Navas J. M. Multilevel assessment and options for the management of cumulative impacts on pelagic ecosystems in the North-Eastern Tropical Pacific Ocean. *Deep-Sea Mining and the Water Column: Advances, Monitoring and Related Issues*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2024, pp. 415 – 473. DOI: 10.1007/978-3-031-59060-3\_13.
15. Sharma R., Smith S. Deep-sea mining and the environment: an introduction. *Environmental issues of deep-sea mining: impacts, consequences and policy perspectives*. 2019, pp. 3 – 22. DOI: 10.1007/978-3-030-12696-4\_1.
16. Sitlhou L., Chakraborty P. Comparing deep-sea polymetallic nodule mining technologies and evaluating their probable impacts on deep-sea pollution. *Marine Pollution Bulletin*. 2024, vol. 206, article 116762. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116762.
17. Katona S., Paulikas D., Stone G. S. Ethical opportunities in deep-sea collection of polymetallic nodules from the Clarion-Clipperton Zone. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2022, vol. 18, no. 3, pp. 634 – 654. DOI: 10.1002/ieam.4554.
18. Priede I. G., Muller-Karger F. E., Niedzielski T. Drivers of biomass and biodiversity of non-chemosynthetic benthic fauna of the Mid-Atlantic Ridge in the North Atlantic. *Frontiers in Marine Science*. 2022, vol. 9, article 866654. DOI: 10.3389/fmars.2022.866654.
19. Amon D. J., Gollner S., Morato T., etc. Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining. *Marine Policy*. 2022, vol. 138, article 105006. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105006.
20. Glazyev M. V., Bazhin V. Y., Glazyeva I. A. Assessment of the effect of microsilica additive on the properties of refractory materials for steelmaking ladles. *Chernye Metally*. 2025, no. 6, pp. 22 – 28. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2025.06.04.
21. Atmanand M. A., Ramadass G. A. Concepts of deep-sea mining technologies. *Deep-sea mining: Resource potential, technical and environmental considerations*. Cham: Springer International Publishing. 2017, pp. 305 – 343. DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0\_10.
22. Janarthanan C., Muruganandhan R., Gopkumar K. Design and multi-body dynamic analysis of inline and offset track configuration in deep-sea mining vehicles for enhanced traction in soft seabed. *Journal of Terramechanics*. 2024, vol. 116, article 100999. DOI: 10.1016/j.jterra.2024.100999.
23. Yungmeister D. A., Smolensky M. P., Serzhan S. L., Urazbakhtin R. Y. Parameters of a stepping device for mining of scattered minerals on the sea bed. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 2, pp. 487 – 502. [In Russ]. DOI: 10.21177/19984502-2024-16-2-487-502.
24. Afanasyev A. A., Litovko S. S., Grigorchuk A. V. Extraction of ferromanganese nodules using a swarm of collecting robots. *Konferentsiya «Osvoenie mineral'nykh resursov Mirovogo okeana»: sbornik tezisev* [Conference «Development of the mineral resources of the World Ocean»: collection of abstracts], Saint-Petersburg, 2024, 81 p. [In Russ].
25. Shishlyannikov D. I., Ivanov S. L., Zvonarev I. E., Zverev V. Yu. Improving efficiency of shearing and hauling machines in longwall potash mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 116 – 124. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-116-124.
26. Baktizin R. N., Zaripov R. M., Korobkov G. E., Masalimov R. B. Assessment of internal pressure effect, causing additional bending of the pipeline. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 160 – 168. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.160.
27. Rakhutin M. G., Kashirskiy A. S. Calculating and forecasting hardware performance for underwater mining of solid minerals. *Vestnik of Tver state technical university. Series «Technical science»*. 2020, no. 4, pp. 39 – 45. [In Russ]. DOI: 10.46573/2658-5030-2020-4-39-45.
28. Makhovikov B. S., Shornikov V. V. Prospects for the development of underwater deposits of ferromanganese nodules on the seabed. *Journal of Mining Institute*. 2004, vol. 157, pp. 190 – 193. [In Russ].

29. Botyan E. Y., Lavrenko S. A., Pushkarev A. E. Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2268 – 2275. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.12.

30. Yubko V. M., Ponomareva I. N., Lygina T. I. The modern trends in the development of equipment and technology exploration and mining of manganese nodules and cobalt-rich ferromanganese crusts in the world ocean. *Journal of Oceanological Research*. 2023, vol. 51, no. 4, pp. 186 – 215. [In Russ]. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).8.

31. 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, no. 12-1, pp. 107 – 128. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_121\_0\_107.

32. Khamidov O. U., Shibanov D. A. Regulated maintenance and repair of quarry excavators considering real-world conditions and operating modes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 12-3, pp. 152 – 167. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_123\_0\_152.

33. Yungmeister D. A., Shpenst V. A., Grigorochuk A. V., Isaev A. I., Smolensky M. P. *Patent RU 2788227*. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич<sup>1</sup> – профессор, профессор,  
e-mail: iungmeister@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0001-7858-8340,

Сержан Сергей Леонидович<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
руководитель направления горно-транспортных систем,  
e-mail: Serzhan\_SL@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0002-2248-9156,

Королев Роман Иванович – канд. техн. наук,  
главный специалист, Санкт-Петербургский филиал  
ООО «ПроТех Инжиниринг», e-mail: rom8592009@yandex.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-5247-9453,

Исаев Алексей Игоревич<sup>1</sup> – канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: Isaev\_AI@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-2246-8440,

Фёдоров Евгений Васильевич<sup>1</sup> – аспирант,  
e-mail: s255014@stud.spmi.ru, ORCID ID: 0009-0006-4595-5996,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

**Для контактов:** Фёдоров Е.В., e-mail: s255014@stud.spmi.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.A. Yungmeister<sup>1</sup>, Professor, Professor,  
e-mail: iungmeister@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0001-7858-8340,

S.L. Serzhan<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Head of Mining  
and Transport Systems, e-mail: Serzhan\_SL@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-2248-9156,

I.R. Korolev, Cand. Sci. (Eng.), Chief Specialist,  
Saint-Petersburg branch of Prostech Engineering,  
199026, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: rom8592009@yandex.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-5247-9453,

A.L. Isaev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
e-mail: Isaev\_AI@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0000-0003-2246-8440,

E.V. Fedorov<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: s255014@stud.spmi.ru,  
ORCID ID: 0009-0006-4595-5996,

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** E.V. Fedorov, e-mail: s255014@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 09.12.2025; получена после рецензии 29.12.2025; принята к печати 19.01.2026.

Received by the editors 09.12.2025; received after the review 29.12.2025; accepted for printing 19.01.2026.