

УДК 551.351.2:622.271.7(985)
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4844
Шифр специальности ВАК: 2.8.8
Научная статья

Исследование изменения качественных характеристик ледовой оболочки грунтоледяных тел в воде

В.Е. Кисляков¹, П.В. Катышев¹, Н.А. Цимбалюк^{2✉}, А.К. Кирсанов¹, Р.З. Нафиков¹

¹ Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

² ООО «НТЦ «Геотехнология», Россия, г. Красноярск

✉ Tsimbalyuk@ro.ru

Аннотация. Актуальность. Арктическая зона Российской Федерации и ее шельфовые площади выступают перспективными источниками восполнения и наращивания минерально-сырьевой базы страны. Известные технологии разработки подводных месторождений твердых полезных ископаемых в настоящее время не находят широкого применения при освоении запасов, расположенных в акваториях Арктики. Авторами данной работы предлагается технология добычи, в основе которой лежат: естественное природное явление в виде ледяных тел, образующихся в морях и озерах, расположенных в различных точках Земли; и различие плотностей воды в ее жидком и твердом агрегатных состояниях. Суть технологии состоит в том, что воздух с отрицательной температурой подается в подводный забой, за счет чего создаются благоприятные условия инициации кристаллизации воды вокруг частиц полезного ископаемого, а следовательно, и образования грунтоледяных тел, обладающих отрицательной гидравлической крупностью, транспортирующих данные частицы со дна к водной поверхности. В качестве преимущества перед уже известными технологиями выделяется возможность исключения из процесса транспортировки грунтозаборных устройств, характеризующихся высокими энергетическими затратами, или уменьшение глубины их работы. **Цель:** исследование изменений качественных характеристик ледяной оболочки грунтоледяного тела в динамике, учитывая влияние температуры окружающей его воды. Полученные результаты будут использованы для научного обоснования параметров и условий применения предлагаемой технологии в северных морях. **Методы:** методы лабораторного моделирования процессов всплытия грунтоледяных тел при различных температурах морской воды, характерных для северных широт. Для эксперимента использовались образцы грунтоледяных тел различной массы, за изменением их веса наблюдали в ходе всего процесса, чтобы определить влияние температурных условий на динамику изменения их физико-механических свойств. **Результаты.** На основе экспериментальных данных была разработана математическая модель, описывающая удельную скорость таяния ледяной составляющей грунтоледяных тел. **Выводы.** Разработанная математическая модель необходима для прогнозирования скорости и продолжительности всплытия грунтоледяных тел при различных температурных условиях акватории, что в свою очередь позволяет расширить понимание об эффективности применения предлагаемой технологии в тех или иных климатических, гидравлических и геологических обстановках. Это дает возможность оценить конкурентоспособность и практичность предлагаемой технологии в конкретных условиях.

Ключевые слова: грунтоледяное тело, скорость оттайки, добыча полезных ископаемых в Арктике, подводная добыча, арктический шельф, способы подводной добычи, подъемная сила

Благодарности: Авторы выражают глубокую благодарность научному руководителю и соавтору, профессору Виктору Евгеньевичу Кислякову, чьи фундаментальные идеи и критические замечания заложили основу данного исследования. Эта работа является данью памяти нашего Учителя и наставника.

Для цитирования: Исследование изменения качественных характеристик ледовой оболочки грунтоледяных тел в воде / В.Е. Кисляков, П.В. Катышев, Н.А. Цимбалюк, А.К. Кирсанов, Р.З. Нафиков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 201–211. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4844

UDC 551.351.2:622.271.7(985)
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4844
Scientific paper

Changes in the qualitative characteristics of the ice shell of soil-ice bodies in water

V.E. Kislyakov¹, P.V. Katyshev¹, N.A. Tsimbalyuk^{2✉}, A.K. Kirsanov¹, R.Z. Nafikov¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

² OOO STC Geotechnology, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉Tsimbalyuk@ro.ru

Abstract. Relevance. The Arctic zone of the Russian Federation and its shelf areas are promising sources for replenishing and increasing the country mineral resource base. Known technologies for the development of underwater deposits of solid minerals are currently not widely used in the development of reserves located in the Arctic waters. The authors propose a mining technology, which is based on: a natural phenomenon in the form of ice bodies formed in the seas and lakes located in different points of the Earth; and the difference in the density of water in its liquid and solid aggregate states. The essence of the technology consists in the fact that air with negative temperature is supplied to the underwater face, due to which favourable conditions are created for initiation of water crystallisation around mineral particles, and, consequently, for formation of soil-ice bodies with negative hydraulic size, transporting these particles from the bottom to the water surface. As an advantage over already known technologies, the paper highlights the possibility of excluding from the transport process the soil intake devices characterised by high energy costs or reducing the depth of their operation. **Aim.** To investigate changes in the qualitative characteristics of the ice shell of the soil-ice body in dynamics, taking into account the impact of the surrounding water temperature. The results obtained will be used for scientific substantiation of parameters and conditions of application of the proposed technology in the northern seas. **Methods.** Laboratory modelling methods of soil-ice body surfacing processes at different sea water temperatures typical for northern waters. Samples of soil-ice bodies of different masses were used for the experiment; their weight changes were observed during the whole process to determine the impact of temperature conditions on the dynamics of changes in their physical and mechanical properties. **Results.** The authors have developed a mathematical model describing the specific melting rate of the ice component of soil-ice bodies on the basis of experimental data. **Conclusions.** The developed mathematical model is necessary for forecasting the speed and duration of soil-ice bodies surfacing under different water area temperature conditions, which in its turn allows expanding the understanding of the efficiency of the proposed technology application in those or other climatic, hydraulic and geological conditions. This makes it possible to assess the competitiveness and practicality of the proposed technology in specific conditions.

Keywords: soil-ice body, defrost rate, Arctic mining, subsea mining, Arctic shelf, subsea mining methods, lifting force

Acknowledgements: The authors express deep gratitude to Viktor E. Kislyakov, professor, scientific advisor and co-author. His fundamental ideas and critical comments laid the foundation of the research. This study is the tribute to our Teacher.

For citation: Kislyakov V.E., Katyshev P.V., Tsimbalyuk N.A., Kirsanov A.K., Nafikov R.Z. Changes in the qualitative characteristics of the ice shell of soil-ice bodies in water. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 201–211. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/4844

Введение

В последнее десятилетие демонстрируется рост спроса на драгоценные и редкие металлы в связи с интенсивным развитием современных технологий, в том числе производством электроэнергии [1–3]. Активная добыча данных металлов из континентальных месторождений твердых полезных ископаемых (далее – ТПИ) по всему миру ведет к снижению общего их количества и среднего содержания полезных компонентов в них [4–9], что является актуальной проблемой с учетом прогнозируемого роста спроса на металлы в ближайшем будущем [10].

Арктические территории занимают площадь в 27 млн км² и являются труднодоступными, что осложняет их промышленное освоение. При этом недра данных территорий являются одним из источников минерально-сырьевой базы таких стран, как Россия, США, Канада, Дания, Исландия, Норвегия, Финляндия и Швеция [11–16].

Освоение месторождений ТПИ в высокоширотных районах за Полярным кругом активно продолжается и в настоящее время. Горнодобывающие компании, обладающие операционными активами в Арктической зоне России, сосредоточены на добыче стратегически важных ресурсов, таких как ни-

кель, медь и металлы платиновой группы (далее – МПГ). В северных регионах Финляндии ведется разработка месторождений никеля, золота, меди, МПГ и кобальта, что подчеркивает богатый минеральный потенциал этих территорий. В Швеции добывают медь, золото, серебро и железную руду, играющую ключевую роль в металлургической промышленности. В Канаде активно разрабатываются месторождения никеля, меди и железной руды, а в США – такие полезные ископаемые, как золото, серебро, цинк и свинец. Норвегия, в свою очередь, фокусируется на добыче угля, что важно для энергетической отрасли и промышленных нужд. Этот широкий спектр добываемых ресурсов подчеркивает значимость арктических территорий в глобальной экономике и стратегическом развитии горнодобывающей промышленности.

Арктические шельфовые площади остаются нетронутыми в плане промышленного освоения на них месторождений ТПИ в первую очередь из-за отсутствия актуальной для данных условий техники и технологии их разработки. При этом на данных территориях Российской Федерации расположены минерально-сырьевые центры с широким спектром полезных компонентов, среди которых можно выделить свинец, цинк, марганец, золото, олово, железо, цирконий, редкоземельные элементы, флюорит, янтарь-ретинит, а также драгоценные и полудрагоценные камни, такие как алмазы, гранат и агаты. Кроме того, в этих районах встречаются ископаемые органического происхождения, такие как раковины и кости мамонтов [17–19].

Анализ актуальных технологий и оборудования для добычи твердых полезных ископаемых на морском дне

На сегодняшний день имеется широкий спектр средств, предназначенных для подводной добычи полезных ископаемых, различающихся по способам добычи и подъема, а также по мощности и степени автономности. Одной из известных является классификация технических средств для подводной добычи полезных ископаемых, представленная в [20], которая была положена в основу классификации, представленной в данной статье, где средства разделены по максимальной глубине их применения (рис. 1):

1. *Глубина разработки 4–30 м.* Чаще всего на этой глубине используются скреперные установки – ковши различного объема, которые опускаются на дно посредством троса. После этого ковш наполняется породой в процессе черпания и далее поднимается механическим способом. Минимальная зависимость данного способа от морских волнений дает возможность его использования для сбора прибрежных россыпей.

Преимуществами таких установок являются их эффективность, экономичность, гибкость и экологичность. Однако они также требуют регулярного технического обслуживания, могут быть ограничены погодными условиями и подвержены риску аварий (обрыву троса). Некоторые системы скреперной добычи ограничены в работе на больших глубинах.

2. *Глубина разработки 15–30 м.* На такой глубине обычно используются земснаряды с грунтовыми насосами – судно или механизм, которое через трубу «всасывает» в себя грунт со дна водоема и транспортирует его на судно. Является одним из наиболее распространенных средств подводной добычи для нерудных полезных ископаемых за счет возможности дополнительной установки обогатительного оборудования и самостоятельной транспортировки груза до порта.

Земснаряды с грунтовыми насосами обладают рядом преимуществ, среди которых высокая производительность, широкая сфера применения, низкое потребление энергии и простота обслуживания. Однако, учитывая их размеры и вес, их не всегда легко перемещать между различными рабочими площадками.

3. *Глубина разработки 6–50 м.* Для такой глубины лучше всего подходят многочерпаковые снаряды, представленные в виде драги – бесконечной цепи ковшей, позволяющей не только отделять породу, но и сразу транспортировать ее на борт корабля.

К преимуществам относят высокую скорость и эффективность работы, большую глубину копания, универсальность, позволяющую адаптировать оборудование для различных условий работы, и надежность, обусловленную простотой конструкции и отсутствием сложных электронных систем.

Из недостатков следует отметить большую массу и габариты, требующие специального транспорта и оборудования, высокую стоимость оборудования и шумность, что может вызывать экологические проблемы.

4. *Глубина разработки 16–65 м.* Наиболее эффективным средством на такой глубине является грейферный снаряд – судно с грузозахватным устройством, устанавливаемым на кране в качестве навесного оборудования. Оно способно работать с кусковыми и сыпучими материалами. Кроме того, устройство позволяет работать с грунтом как выше, так и ниже уровня стоянки крана.

Преимуществами использования данного способа является высокая скорость работы, возможность работы с различными типами материалов и в разных климатических условиях. Недостатками являются ограничения по их весу и размеру, что

может сужать возможности использования данного средства в некоторых ситуациях.

5. *Глубина разработки 25–100 м.* На такой глубине обычно используются модифицированные земснаряды – эрлифтный и эжекторный. Первый работает по принципу эрлифта, где используется сжатый воздух для подъема воды с грунтом на поверхность.

Преимуществами эрлифтных земснарядов являются простота конструкции, надежность и относительно невысокая стоимость. Однако они имеют ограниченную производительность по сравнению с другими типами земснарядов.

Второй тип земснаряда использует принцип эжекции – процесса, при котором поток жидкости или газа создает разрежение и втягивает другую среду. Основные преимущества – экономичность и эффективность. Они потребляют меньше энергии, так как не требуют установки дополнительного насоса для перекачки грунта. Вместо этого грунт всасывается непосредственно в трубу с помощью эжектора. Недостатками эжекторного земснаряда является невозможность добычи тяжелых грунтов, а их эффективность зависит от характеристик грунта и условий работы, таких как скорость течения и глубина залегания грунта.

6. *Глубина разработки до 500 м.* Подобная глубина создает серьезные трудности при извлечении полезных ископаемых из-за большого давления, отсутствия света и сильного холода. Поэтому для добычи ресурсов используются подводные экскаваторы, имеющие повышенную прочность. Зачастую они оборудованы специальными системами, такими как навигация и контроль глубины.

Основным преимуществом подобных устройств является возможность работать на большой глубине. К недостаткам относится дороговизна, жесткие пределы по доступной глубине (для каждой модели) и сложность в управлении.

7. *Глубина разработки более 1000 м.* На такой глубине работают только автономные комплексы, большая часть из которых находится в состоянии постоянного улучшения для повышения эффективности и, как следствие, рентабельности.

Наиболее популярным способом добычи подобных комплексов является его опускание с открытым ковшем. При достижении дна включается механизм закрытия ковша, который подгребают грунт. После этого комплекс поднимается на поверхность и загружается на судно.

Преимуществами данных комплексов является максимальная глубина для добычи полезных ископаемых, а недостатком – сверхвысокая стоимость каждого аппарата.

С учетом вышеизложенного авторами составлена систематизация средств добычи полезного ископаемого со дна акватории по принципу максимальной глубины добычи (рис. 2) [21].

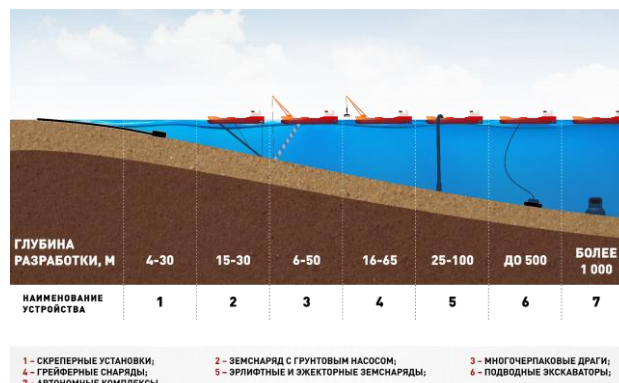


Рис. 1. Систематизация средств подводной добычи по принципу максимальной глубины добычи

Fig. 1. Systematization of subsea mining tools according to the principle of maximum depth of extraction



Рис. 2. Систематизация средств подводной добычи по принципу подъема полезного ископаемого

Fig. 2. Systematization of subsea mining tools according to the principle of mineral lifting method

Каждый анализируемый метод обладает преимуществами и недостатками. Например, гидравлическое драгирование отличается высокой производительностью при относительно низких капитальных затратах. В то время как методы, использующие многоковшовые или канатные драги, обеспечивают возможность работы на значительных глубинах, что делает их эффективными для извлечения грунта на большой глубине. Весьма перспективным при добыче на больших глубинах является добыча автономными комплексами, так как данное

средство не требует связи с судном, тем самым уменьшая на это капитальные затраты.

Однако использование данных способов в районе Крайнего Севера может быть осложнено различными неблагоприятными условиями, что в свою очередь существенно повлияет на скорость и качество выполняемых производственных операций.

В этой связи актуальной становится задача по разработке технологии добычи твердых полезных ископаемых со дна Арктического шельфа.

Разработка технологии добычи ТПИ с Арктического шельфа

Как говорилось ранее, существующие технологии добычи ТПИ с шельфа не применимы или малоэффективны при использовании в северных условиях, в том числе в Арктике. Подводные горные работы, проводимые в данных условиях с постоянной отрицательной температурой, имеют необходимость включения дополнительных мероприятий по борьбе с обледенением добычного оборудования, что влечет за собой усложнение организации всех работ с целью избежания простоев или выхода из строя оборудования, а также повышения энергопотребления и затрат на него [22]. Одним из возможных способов приблизить начало промышленного освоения Арктического шельфа – найти полезное применение характерным факторам в виде отрицательной температуры окружающей среды и ледообразования, которые могут выступить в качестве инструмента повышения эффективности подводных горных работ, а не наоборот.

С учетом вышесказанного авторами была разработана технология добычи ТПИ с Арктического шельфа (рис. 3) [23], представляющая собой использование двух судов – добычного и судна-сборщика.

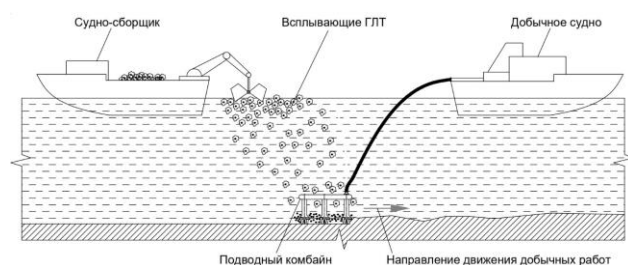


Рис. 3. Общая схема ведения добычных работ по предлагаемой технологии

Fig. 3. General scheme of mining operations under the proposed technology

Добычное судно осуществляет управление подводным комбайном, который за счет рыхления с параллельной подачей воздуха с отрицательной температурой (хладагента) создает такие условия в

подводном забое, при которых инициируется процесс кристаллизации воды вокруг взвешенных частиц полезного ископаемого. В то же время нарастающая ледяная корка, образующаяся на поверхности частиц полезных ископаемых, приводит к формированию так называемых грунтоледяных тел (далее – ГЛТ). Эти тела, благодаря положительной плавучести льда, поднимаются на поверхность воды, что позволяет существенно снизить энергетические затраты на их транспортировку.

Судно-сборщик производит экскавацию всплывающих ГЛТ с поверхности воды.

Образование придонного (внутриводного) льда происходит при наличии центров кристаллизации и переохлажденной воды. В природе известно подобное образование ледяных тел, но на водной поверхности центрами кристаллизации выступают уже образовавшиеся частицы льда, наиболее крупные частицы шуги, частицы пыли или пузырьки воздуха (рис. 4).

В процессе реализации предложенной технологии добычи частицы полезных ископаемых, находящиеся во взвешенном состоянии, будут служить центром кристаллизации льда. Образование льда на этих частицах будет происходить за счет непрерывной подачи в подводный забой воздуха с отрицательной температурой, функционирующего в роли хладагента и катализатора кристаллизации. В результате этого процесса в подводном забое образуется ледяная оболочка вокруг частиц полезных ископаемых. Этот процесс позволяет эффективно интегрировать ледообразование с технологиями подводной добычи, улучшая условия транспортировки и извлечения полезных ископаемых.

Отрицательная гидравлическая крупность ГЛТ создается из условия постоянной подачи воздуха отрицательной температуры (хладагента) в забой для создания условий, при которых произойдет нарастание необходимой мощности ледяной оболочки вокруг частицы полезного ископаемого, дающей возможность беспрепятственного всплытия ГЛТ к водной поверхности.

При этом ледовая оболочка ГЛТ будет находиться в постоянном контакте с водой положительной температуры, тем самым вызывая процесс таяния льда и снижая его грузоподъемность.

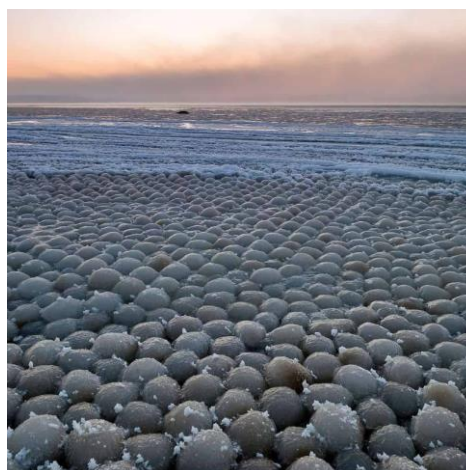
В связи с чем появилась необходимость проверки условий применения и параметров предложенной технологии. Для этого был проведен эксперимент, в ходе которого изучался процесс таяния ледяной корки ГЛТ во время всплытия.

Объект исследования и методика проведения эксперимента

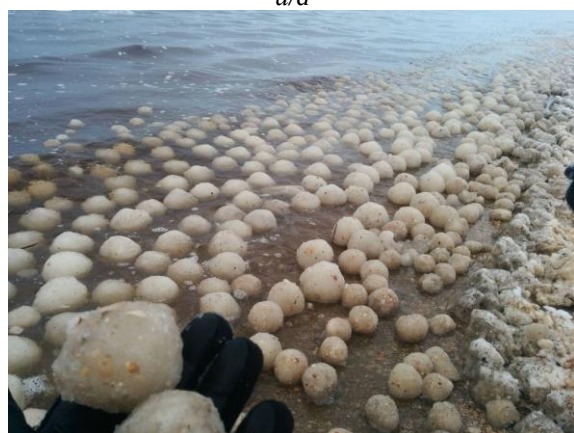
Одним из ключевых факторов, определяющих работоспособность и эффективность предлагаемой технологии, является ее применение в северных морях.



a/a



b/b



в/с

Рис. 4. Примеры образования ледяных тел: а) Обская губа (Российская Федерация) [24]; б) Таллинский залив (Эстония) [25]; в) озеро Мичиган (США) [26]

Fig. 4. Examples of ice body formation: a) Gulf of Ob (Russian Federation) [24]; b) Gulf of Tallinn (Estonia) [25]; c) Lake Michigan (USA) [26]

Эти регионы предоставляют уникальные условия, которые способствуют оптимальному функционированию данной технологии. Холодные температуры и специфическая гидрология северных морей создают идеальные условия для кристаллизации льда на частицах полезных ископаемых, что является центральным элементом технологии.

Именно по этой причине лабораторное моделирование процесса таяния ледяной корки ГЛТ при всплытии было проведено в воде с температурой в интервале от 1 до 7 °С. Оловянные дробинки выполняли роль частиц полезного ископаемого и, соответственно, выступали в качестве центра кристаллизации.

Создание образцов ГЛТ выполнялось следующим образом. Для образования ледяной части образцов ГЛТ в морозильную камеру с отрицательной температурой помещались формы для льда с водой для ее кристаллизации, то есть перехода из жидкого агрегатного состояния в твердое – лед. До момента полной кристаллизации в каждую форму добавлялась оловянная дробинка, которая выполняла функцию грунтовой части образца ГЛТ, и нить, которая необходима для фиксации образца ГЛТ на экспериментальном стенде [27].

При этом подъемная способность ледяной части каждого образца ГЛТ была ниже, чем масса размещаемых в ней оловянных дробинки.

На протяжении всего эксперимента производилось измерение температуры воды на контакт с ГЛТ.

Структура экспериментально стенда представлена на рис. 5.

Эксперимент проводился в холодильном складе с использованием одной установки (рис. 5) и заранее подготовленными образцами ГЛТ массой 15, 30 и 50 г по 35 шт. Всего было произведено по 7 серий опытов на группах образцов с одинаковой массой, но при различной температуре помещения и, соответственно, воды в контейнере, в интервале от 1 до 7 °С с шагом в 1 °С.

Последовательность работ в ходе эксперимента была следующая. На одном из концов блока, закрепленного на штативе, с помощью нити размещалась гиря, а на другом конце – образец ГЛТ. После этого гиря устанавливалась на электронных весах, а образец ГЛТ помещался в прозрачную емкость с заранее наполненной водой с заданной температурой в интервале, указанном выше. Последующий процесс таяния ледяной корки ГЛТ отслеживался с помощью фиксации изменения веса образцов ГЛТ по данным с электронных весов.

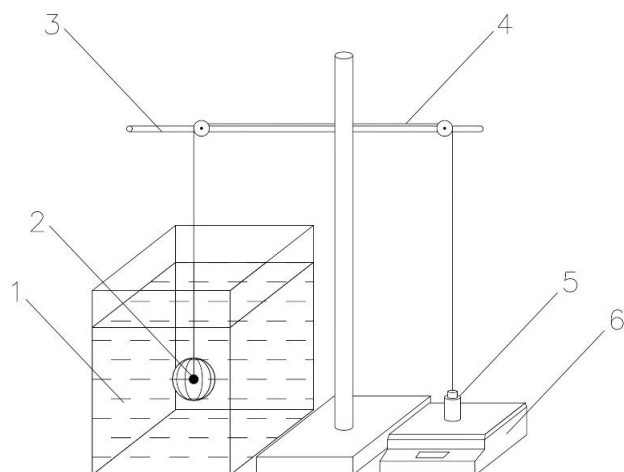


Рис. 5. Экспериментальная установка: 1 – прозрачный контейнер с водой; 2 – образец грунтоледяного тела; 3 – штатив с крепежным блоком; 4 – подвесная нить; 5 – груз; 6 – цифровые весы

Fig. 5. Experimental setup: 1 – transparent container with water; 2 – sample of soil-ice body; 3 – tripod with fixing block; 4 – hanging thread; 5 – weight; 6 – digital scales

Результатами проведенного лабораторного эксперимента являются зафиксированные данные, определяющие скорость и интенсивность таяния ледяной корки ГЛТ.

Результаты исследования

Процесс всплытия ГЛТ с морского дна на поверхность воды моделируется с учетом того, что внешняя поверхность ледяной оболочки ГЛТ, обладающая отрицательной температурой, соприкасается с водой, температура которой положительна, хотя и находится в низком диапазоне. Эта температурная разница вызывает явление, известное как поверхностное плавление, при котором ледяная оболочка ГЛТ постепенно тает.

В процессе поверхностного плавления формируется тонкая жидкая пленка, или квазижидкий поверхностный слой [28], который при достижении температуры плавления льда в 0°C приводит к разрушению кристаллической решетки льда. Этот процесс контролируется факторами, связанными с динамикой теплопередачи, включая скорость переходных процессов в условиях свободной конвекции в спокойной воде и вынужденной конвекции при наличии циркуляции воды.

Для построения математической модели оттайки ледяной корки ГЛТ необходимо определить некоторые из геометрических параметров образцов ГЛТ.

Объем образцов ГЛТ можно определить по формуле (1):

$$V_0 = \frac{m_{\text{л}}}{\rho_{\text{л}}} + \frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}}, \text{ см}^3, \quad (1)$$

где $m_{\text{л}}$ и $m_{\text{г}}$ – исходная масса льда и грунта, соответственно, г; $\rho_{\text{л}}$ и $\rho_{\text{г}}$ – плотность льда и грунта, соответственно, г/см³.

Формирование грунтоледяных тел будет происходить постепенно при постоянной подаче холодного воздуха (хладагента) в подводный забой. По мере образования ГЛТ толщина ледяной корки будет увеличиваться, а ее общая форма вокруг частиц полезного ископаемого будет стремиться приобретать сферическую или близкую к ней конфигурацию.

Используя формулу объема шара, можно вычислить радиус образцов грунтоледяных тел (2)–(4):

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3, \text{ см}^3, \quad (2)$$

$$3 \cdot V = 4 \cdot \pi \cdot R^3, \quad (3)$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi}}, \text{ см}. \quad (4)$$

Площадь образцов ГЛТ определим через формулу площади шара (5), подставив в нее уравнение (4)

$$S_0 = 4 \cdot \pi \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi}} \right)^2, \text{ см}^2. \quad (5)$$

В получившемся уравнении (6) заменяем V на выражение (1)

$$S_0 = 4,835 \cdot \left(\sqrt[3]{V_0} \right)^2, \text{ см}^2. \quad (6)$$

В таблице представлены параметры образцов ГЛТ, использованных в ходе эксперимента.

Таблица. Параметры грунтоледяных тел

Table. Parameters of soil-ice bodies

Исходная масса образца, г Initial mass of sample, g	Радиус образца, см Sample radius, cm	Площадь поверхности образца, см ² Surface area of the sample, cm ²
15	1,53	29,41
30	1,93	46,69
50	2,29	65,63

Исходная масса грунтоледяного тела может быть вычислена с использованием следующей формулы (7):

$$m_{\text{глт}} = m_{\text{л}} + m_{\text{г}}, \text{ г}. \quad (7)$$

На основе данных, полученных в ходе проведенного эксперимента, была разработана следующая математическая модель для описания процесса оттайки грунтоледяного тела (8):

$$m_{\text{л}} = m_{\text{глт}} - q \cdot T \cdot 10^3, \text{ г}, \quad (8)$$

где q – скорость оттайки ГЛТ, мг/мин; T – время, в течение которого образец находился в воде, мин.

Эта модель описывает скорость оттайки ГЛТ с помощью уравнения (9):

$$q = a \cdot e^{b \cdot t_b}, \text{ мг/мин}, \quad (9)$$

где t_b – температура воды, °C; a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от исходной массы образца, которые определяются следующими зависимостями (10), (11):

$$a = -0,0638 \cdot m_{\text{ГЛТ}} + 11,423, \quad (10)$$

$$b = -0,00009 \cdot m_{\text{ГЛТ}} + 0,19003. \quad (11)$$

Зависимость скорости оттайки ГЛТ различной массы от температуры воды иллюстрируется на графиках, представленных на рис. 6–8.

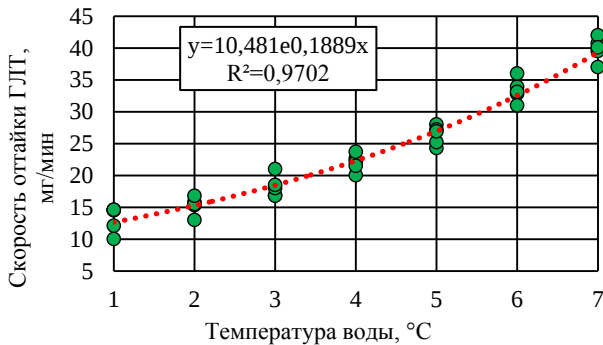


Рис. 6. Влияние температуры воды на скорость оттайки образца ГЛТ массой 15 г

Fig. 6. Water temperature effect on the defrost rate of a 15 g SIB sample

Скорость оттайки образца ГЛТ массой 15 г изменяется от минимальных 10,0 мг/мин при 1 °C до максимальных 42,0 мг/мин при 7 °C, то есть увеличивается в 4,2 раза.

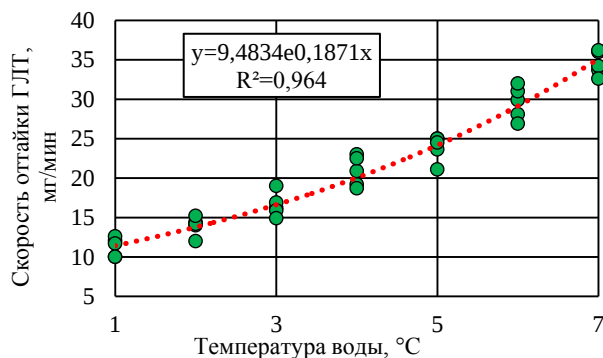


Рис. 7. Влияние температуры воды на скорость оттайки образца ГЛТ массой 30 г

Fig. 7. Water temperature effect on the defrost rate of a 30 g SIB sample

Скорость оттайки образца ГЛТ массой 30 г изменяется от минимальных 9,9 мг/мин при 1 °C до максимальных 36,2 мг/мин при 7 °C, то есть увеличивается в 3,6 раза.

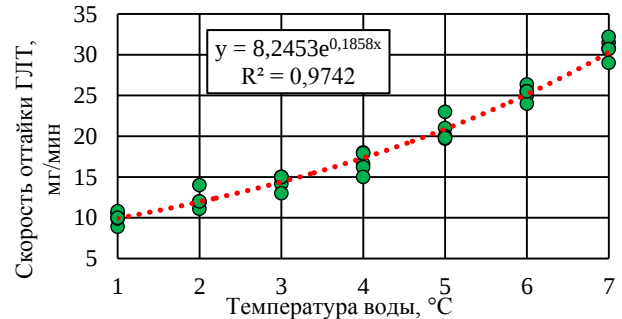


Рис. 8. Влияние температуры воды на скорость оттайки образца ГЛТ массой 50 г

Fig. 8. Water temperature effect on the defrost rate of a 50 g SIB sample

Скорость оттайки образца ГЛТ массой 50 г изменяется от минимальных 8,9 мг/мин при 1 °C до максимальных 32,2 мг/мин при 7 °C, то есть также увеличивается в 3,6 раза.

По графикам, приведенным на рис. 6–8, можно сказать, что при изменении температуры воды с 1 до 7 °C скорость оттайки ледяной части образцов ГЛТ увеличивается в среднем на 26,7 мг/мин для образца массой 15 г, 23,3 мг/мин для образца массой 30 г и 20,8 мг/мин для образца массой 50 г, то есть более чем на 300 %. При этом в среднем при повышении температуры воды на 1 °C скорость оттайки образцов ГЛТ вне зависимости от массы увеличивается на 20 % от предыдущего значения.

Высокий уровень корреляции, наблюдаемый в математической модели определения скорости оттайки ГЛТ, свидетельствует о том, что модель достаточно точно отражает реальные физические процессы. Такой результат дает основания считать её применимой для прогнозирования скорости всплытия ГЛТ и, следовательно, времени его всплытия при различных условиях его образования.

В ходе проведения эксперимента также было установлено, что наличие пузырьков воздуха в ледяной корке грунтоледяного тела представляет собой значительный положительный аспект, способствующий увеличению подъемной силы. Фактически пузырьки воздуха создают дополнительную воздушную прослойку внутри льда, что снижает его среднюю плотность и, следовательно, увеличивает подъемную силу. Это явление имеет важное значение для повышения эффективности предложенной технологии подводной добычи, так как более повышенная подъемная сила увеличивает производительность транспортировки ГЛТ с морского дна на поверхность.

Заключение

В заключение важно подчеркнуть, что исследования, направленные на разработку инновационных технологий добычи твердых полезных ископаемых с Арктического шельфа Российской Федерации, являются весьма перспективным направлением. Разработка и внедрение передовых технологий в этой области может существенно повысить эффективность добычи, снизить затраты и минимизировать экологические риски, связанные с эксплуатацией арктических месторождений.

Использование грунтоледяных тел, образующихся на несвязных породах под водой, является уникальным решением, позволяющим использовать отрицательную температурную среду для выемки и дальнейшей транспортировки полезного ископаемого на поверхность. Проведенный эксперимент по изучению качественных характеристик ледяной корки при всплытии грунтоледяных тел в условиях различной температуры воды демонстри-

рует актуальные сведения о зависимостях скорости оттайки.

Результаты эксперимента позволили разработать математическую модель, которая дает возможность определить скорость оттайки грунтоледяных тел. Данная модель будет полезна при прогнозировании скорости и продолжительности всплытия грунтоледяных тел с учетом конкретных условий их образования.

Полученные результаты исследования подчеркивают возможность адаптации предложенной технологии к уникальным условиям Арктики, открывая перспективы для пополнения и расширения минерально-сырьевой базы страны. Дальнейшие исследования в этом направлении будут направлены на совершенствование предлагаемой технологии, оптимизации ее параметров и обеспечение практического применения в промышленных условиях, что в конечном итоге будет способствовать экономическому росту и стратегической ресурсной безопасности Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis / J. Yang, Y. Yu, T. Ma, C. Zhang, Q. Wang // *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*. – 2021. – Vol. 19. – № 3. – P. 256–264.
2. Watari T., Nansai K., Nakajima K. Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: a critical review // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 164. – P. 105107.
3. Jowitt S.M., Mudd G.M., Thompson J.F.H. Future availability of non-renewable metal resources and the influence of environmental, social, and governance conflicts on metal production // *Communications Earth & Environment*. – 2020. – Vol. 1. – P. 13.
4. Mudd G.M. Global trends in gold mining: towards quantifying environmental and resource sustainability // *Resources Policy*. – 2007. – Vol. 32. – № 1–2. – P. 42–56.
5. Mudd G.M. Key trends in the resource sustainability of platinum group elements // *Ore Geology Reviews*. – 2012. – Vol. 46. – P. 106–117.
6. Mudd G.M. The future of Yellowcake: a global assessment of uranium resources and mining // *Science of The Total Environment*. – 2014. – Vol. 472. – P. 590–607.
7. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining / S. Northey, S. Mohr, G.M. Mudd, Z. Weng, D. Giurco // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2014. – Vol. 83. – P. 190–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.005>
8. Rötzer N., Schmidt M. Decreasing metal ore grades – is the fear of resource depletion justified? // *Resources*. – 2018. – Vol. 7. – № 4. – P. 88. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources7040088>
9. Кирсанов А.К., Катышев П.В. Экономические стимулы для развития подводной добычи полезных ископаемых // *Известия вузов. Горный журнал*. – 2024. – № 1. – С. 20–26. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-20-26.
10. Watari T., Nansai K., Nakajima K. Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: a critical review // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2021. – Vol. 164. – P. 105107.
11. Волков А.В., Галямов А.Л., Лобанов К.В. Минеральное богатство циркумарктического пояса // *Арктика: экология и экономика*. – 2019. – № 1 (33). – С. 106–117.
12. Тельхигова М.Ш. Значение континентального шельфа Арктики в обеспечении энергетической безопасности Российской Федерации // *Пробелы в российском законодательстве*. – 2015. – № 1. – С. 135–139.
13. Кондратьев В.Б. Минеральные ресурсы и будущее Арктики // *Горная промышленность*. – 2020. – № 1. – С. 87–96.
14. Volkov A.V., Sidorov A.A. The interior of the Russian Arctic: a trove of metals for green technology // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 2020. – Vol. 90 (1). – P. 73–78.
15. Твердые полезные ископаемые дна мирового океана – потенциальные объекты для развития геотехнологических методов / А.Л. Вильмис, М.И. Буянов, И.С. Калинин, В.А. Тивоненко // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 3-1. – С. 147–154.
16. Современное состояние проблем освоения твердых минеральных ресурсов дна морей и океанов / В.П. Дробаденко, Г.Н. Малухин, О.А. Луканина, И.Н. Салахов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 3-1. – С. 99–109.
17. Минералогия континентальной окраины и шельфа Арктической зоны России / А.М. Иванова, А.Н. Смирнов, В.Д. Каминский, В.Г. Гопчак, Е.Н. Крейтер, Е.А. Пашковская, Е.С. Попова // *70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. Сборник научных трудов: посвященный 70-летию юбилею НИИГА-ВНИИОкеангеология*. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. – С. 342–350.
18. Месторождения стратегических металлов Арктической зоны / Н.С. Бортников, К.В. Лобанов, А.В. Волков, А.Л. Галямов, И.В. Викентьев и др. // *Геология рудных месторождений*. – 2015. – Vol. 57 (6). – С. 479–500.

19. Изучение влияния низких температур окружающего воздуха и морской воды на возможность добычи твердых полезных ископаемых в арктических водах / В.Е. Кисляков, П.В. Катышев, А.Н. Анушенков, Я.Е. Линьков, А.К. Кирсанов // Горная промышленность. – 2024. – № 4. – С. 81–88.
20. Технология подводной разработки морских россыпных месторождений / Г.А. Нурок, Ю.В. Бурякин, Ю.В. Бубка, В.Г. Королев. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1974. – 205 с.
21. Добыча полезных ископаемых со дна континентального шельфа автономным подводным комплексом / В.Е. Кисляков, П.В. Катышев, Н.А. Шкаруба, В.С. Елизарьев, Я.Р. Башкатова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3-1. – С. 318–329.
22. Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.U. Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – № 1399 (4). – P. 044070.
23. Комплекс для добычи полезных ископаемых со дна водоема: пат. Рос. Федерация № 2810662; заявл. 20.02.2023; опубл. 28.12.2023.
24. Ледяные шары на Ямале // RT на русском. URL: <https://russian.rt.com/foto/330325-ledyanie-shary-na-yamale> (дата обращения: 25.09.2024).
25. Редкое природное явление в Эстонии: пляж покрыт ледяными яйцами // Mixnews.lv. 2023. URL: <https://mixnews.lv/v-mire/2023/01/24/redkoe-prirodnoe-yavlenie-v-estonii-plyazh-pokryt-ledyanymi-yaytsami/> (дата обращения: 25.09.2024).
26. Rare phenomena of frozen ice balls of Lake Michigan and Stroomi Beach // Charismatic Planet. URL: <https://charismaticplanet.com/ice-balls-of-lake-michigan-stroomi-beach/> (дата обращения: 25.09.2024).
27. Кисляков В.Е., Лакин Д.А. Исследование скорости оттайки грунтоледовых тел в воде // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: техника и технологии. – 2013. – № 6 (7). – С. 774–778.
28. Wei X., Miranda P.B., Shen Y.R. Surface vibrational spectroscopic study of surface melting of ice // Physical Review Letters. – 2001. – Vol. 86. – P. 1554–1557.

Информация об авторах

Виктор Евгеньевич Кисляков, доктор технических наук, профессор кафедры открытых горных работ, Сибирский федеральный университет, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95; vkislyakov@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0297-2893>

Павел Викторович Катышев, кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ, Сибирский федеральный университет, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95; PKatyshev@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0009-0003-5249-5965>

Николай Александрович Цимбалюк, ведущий инженер ООО «НТЦ «Геотехнология», Россия, 660037, г. Красноярск, ул. Мичурина, 2ж; Tsimbalyuk@ro.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5593-6701>

Александр Константинович Кирсанов, кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного и подземного строительства, Сибирский федеральный университет, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95; AKirsanov@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7977-4954>

Равиль Зиннурович Нафиков, кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ, Сибирский федеральный университет, Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95; RNafikov@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7288-0981>

Поступила в редакцию: 30.09.2024

Поступила после рецензирования: 07.10.2024

Принята к публикации: 30.06.2025

REFERENCES

1. Yang J., Yu Y., Ma T., Zhang C., Wang Q. Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2021, vol. 19, no. 3, pp. 256–264.
2. Watari T., Nansai K., Nakajima K. Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: a critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 164, pp. 105107.
3. Jowitt S.M., Mudd G.M., Thompson J.F.H. Future availability of non-renewable metal resources and the influence of environmental, social, and governance conflicts on metal production. *Communications Earth & Environment*, 2020, vol. 1, pp. 13.
4. Mudd G.M. Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability. *Resources Policy*, 2007, vol. 32, no. 1–2, pp. 42–56.
5. Mudd G.M. Key trends in the resource sustainability of platinum group elements. *Ore Geology Reviews*, 2012, vol. 46, pp. 106–117.
6. Mudd G.M. The future of Yellowcake: a global assessment of uranium resources and mining. *Science of The Total Environment*, 2014, vol. 472, pp. 590–607.
7. Northey S., Mohr S., Mudd G.M., Weng Z., Giurco D. Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, vol. 83, pp. 190–201.
8. Rötzer N., Schmidt M. Decreasing metal ore grades – is the fear of resource depletion justified? *Resources*, 2018, vol. 7, pp. 88.
9. Kirsanov A.K., Katyshev P.V. Economic drivers of seabed mining. *Minerals and Mining Engineering*, 2024, no. 1, pp. 20–26. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-20-26.
10. Watari T., Nansai K., Nakajima K. Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: a critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 164, pp. 105107.
11. Volkov A.V., Galyamov A.L., Lobanov K.V. Mineral wealth of the circumarctic belt. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 1 (33), pp. 106–117. (In Russ.).

12. Telkhigova M.Sh. The importance of the Arctic continental shelf in ensuring the energy security of the Russian Federation. *Gaps in Russian Legislation*, 2015, no. 1, pp. 135–139. (In Russ.).
13. Kondratyev V.B. Mineral resources and the future of the Arctic. *Russian Mining Industry*, 2020, no. 1, pp. 87–96. (In Russ.).
14. Volkov A.V., Sidorov A.A. The interior of the Russian Arctic: a trove of metals for green technology. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 90 (1), pp. 73–78.
15. Vilms A.L., Buyanov M.I., Kalinin I.S., Tivonenko V.A. Solid mineral deposits of the world ocean-potential objects for the development of geotechnologies. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2021, no. 3-1, pp. 147–154. (In Russ.).
16. Drobadenko V.P., Malukhin G.N., Lukonina O.A., Salakhov I.N. Solid marine mineral mining: current situation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2021, no. 3-1, pp. 99–109. (In Russ.).
17. Ivanova A.M., Smirnov A.N., Kaminskii V.D., Gopchak V.G., Kreiter E.N., Pashkovskaya E.A., Popova E.S. Minerageny of the continental margin and shelf of the Arctic zone of Russia. In: *70 Years in the Arctic, Antarctic and World Ocean. Collection of Scientific Proceedings dedicated to the 70th anniversary of NIIGA-VNIOkeangeologiya*. St. Petersburg, VNIOkeangeologia Publ., 2018. pp. 342–350. (In Russ.).
18. Bortnikov N.S., Lobavnov K.V., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikentyev I.V. Deposits of strategic metals in the Arctic region. *Geology of Ore Deposits*, 2015, vol. 57 (6), pp. 479–500. (In Russ.).
19. Kislyakov V.E., Katyshev P.V., Anushenkov A.N., Linkov Ya.E., Kirsanov A.K. Study of the impact of low ambient air and seawater temperatures on the possibility of mining solid minerals in arctic waters. *Russian Mining Industry*, 2024, no. 4, pp. 81–88. (In Russ.).
20. Nurok G.A., Buryakin Yu.V., Bubka Yu.V., Korolev V.G. *Technology of underwater development of marine placer deposits*. Leningrad, Leningrad University Publ. House, 1974. 205 p. (In Russ.).
21. Kislyakov V.E., Katyshev P.V., Shkaruba N.A., Elizarev V.S., Bashkatova Ya.R. Autonomous underwater vehicles for mineral mining on the continental shelf. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2021, no. 3-1, pp. 318–329. (In Russ.).
22. Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.U. Weather conditions as a factor affecting the performance of modern powerful mining excavators. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1399 (4), pp. 044070.
23. Kislyakov V.E., Katyshev P.V., Tsimbalyuk N.A., Lopatina A.N. *Complex for mining minerals from the bottom of the reservoir*. Patent RF, no. 2810662, 2023. (In Russ.).
24. *Ice spheres in Yamal*. (In Russ.) Available at: <https://russian.rt.com/foto/330325-ledyanye-shary-na-yamale> (accessed 25 September 2024).
25. *Rare natural phenomenon in Estonia: the beach is covered with ice eggs*. (In Russ.) Available at: <https://mixnews.lv/v-mire/2023/01/24/redkoe-prirodnoe-yavlenie-v-estonii-plyazh-pokryt-ledyanymi-yaytsami/> (accessed 25 September 2024).
26. *Rare Phenomena of Frozen Ice Balls of Lake Michigan and Stroomi Beach*. Available at: <https://charismaticplanet.com/ice-balls-of-lake-michigan-stroomi-beach/> (accessed 25 September 2024).
27. Kislyakov V.E., Lakin D.A. The rate of defrost ice-ground bodies in the water. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2013, no. 6 (7), pp. 774–778. (In Russ.).
28. Wei X., Miranda P.B., Shen Y.R. Surface vibrational spectroscopic study of surface melting of ice. *Physical Review Letters*, 2001, vol. 86, pp. 1554–1557.

Information about the authors

Victor E. Kislyakov, Dr. Sc., Professor, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarsky rabochy avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation; VKislyakov@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0297-2893>

Pavel V. Katyshev, Cand. Sc., Senior Lecturer, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarsky rabochy avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation; PKatyshev@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0009-0003-5249-5965>

Nikolay A. Tsimbalyuk, Leading Engineer, OOO STC Geotechnology, 2zh, Michurin street, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; Tsimbalyuk@ro.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5593-6701>

Aleksandr K. Kirsanov, Cand. Sc., Senior Lecturer, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarsky rabochy avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation; AKirsanov@sfu-kras.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7977-4954>

Ravil Z. Nafikov, Cand. Sc., Senior Lecturer, Siberian Federal University, 95, Krasnoyarsky rabochy avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation. RNafikov@sfu-kras.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7288-0981>

Received: 30.09.2024

Revised: 07.10.2024

Accepted: 30.06.2025