

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ
GEOTECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 622.271.5:551.321(211-17)

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-147-162

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ХОЛОДА ДЛЯ ДОБЫЧИ
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ШЕЛЬФА С УЧЕТОМ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ**

Цимбалюк Николай Александрович ^{1*},
Кисляков Виктор Евгеньевич ²,
Катышев Павел Викторович ²,
Тагиров Ризван Ризванулаевич ³,
Кирсанов Александр Константинович ²

¹ АО «Прииск Удерецкий»² Сибирский федеральный университет³ ООО «НТЦ «Геотехнология»

* для корреспонденции: tsimbalyuk@ro.ru.

**Информация о статье**

Поступила:

23 января 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 сентября 2025 г.

Принята к публикации:

30 сентября 2025 г.

Опубликована:

23 октября 2025 г.

Ключевые слова:

подводная добыча, Арктика,
шельф, экология,
глубоководные экосистемы,
негативные факторы,
грунтоледяное тело,
хладагент, математическая
модель

Аннотация.

Горнодобывающая промышленность является одним из источников негативного воздействия на экологию, как в процессе непосредственной деятельности, так и после завершения работ. Оценка негативных последствий для флоры и фауны обязательна и при освоении месторождений твердых полезных ископаемых, расположенных на дне морей и океанов, что влечет за собой ограничения для данного рода деятельности. Кроме этого, в виде ограничений выступают максимально возможная глубина отработки существующими технологиями и возможность их применения в суровых климатических условиях, характеризующихся низкими температурами и продолжительным ледовым покровом северных акваторий. В данной работе авторами предложена перспективная технология освоения подобных месторождений на территории Арктического шельфа с использованием энергии холода, позволяющей организовать процесс добычи и транспортировки полезного ископаемого с помощью грунтоледяных тел, которая при сравнении с уже известными способами влечет меньшее количество факторов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Обоснование возможности применения данной технологии в промышленных масштабах заключается в определении условий ее работоспособности и эффективности в тех или иных условиях, для чего был произведен эксперимент с моделированием процесса всплытия грунтоледяных тел со дна к водной поверхности. По результатам данного эксперимента была разработана математическая модель определения необходимого количества льда в составе грунтоледяного тела, позволяющего организовать процесс всплытия. Выполненные исследования приближают возможность практического применения предложенной технологии, дающей возможность использования отрицательной температуры окружающей среды в качестве технологической среды для снижения удельных затрат на транспортировку и предусматривающей снижение воздействия на окружающую среду

Для цитирования: Цимбалюк Н.А., Кисляков В.Е., Катыхшев П.В., Тагиров Р.Р., Кирсанов А.К. Перспективы использования энергии холода для добычи твердых полезных ископаемых шельфа с учетом экологических аспектов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 5 (171). С. 147-162. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-147-162, EDN: QVTHPC

Введение (Introduction)

На фоне промышленно-технологического развития, научно-технического прогресса, роста спроса и цен на металлы, а также истощения доступных для добычи месторождений твердых полезных ископаемых и снижения их количественно-качественных показателей можно выделить перспективное направление для экономически выгодного освоения подводных месторождений, расположенных на дне морей и океанов.

В настоящее время наиболее широко распространено влияние горнодобывающей промышленности по всему миру в континентальных границах, то есть на суше. При этом нельзя исключать высокий потенциал морского дна как перспективного источника минерального сырья.

В связи с этим остаются актуальными вопросы в определении критериев применимости существующих технологий добычи в данных условиях или поиск и разработка новых эффективных решений, в том числе с учетом современных требований в области охраны окружающей среды. Так как любая антропогенная деятельность логически наносит вред окружающей среде [1], то и подводная добыча твердых полезных ископаемых не является исключением [2, 3].

Хоть океан и является колыбелью жизни [4], стоит выделить более разнообразный биоценоз суши по сравнению с океаном [5], что связано с большим разнообразием типов и видов живых организмов, разнообразием среды. Вследствие этого можно отметить, что вред от работ на суше гораздо больше, чем на морском дне.

Фактически любая деятельность сопряжена с изменением окружающей среды, что обычно носит негативные последствия. Как бы парадоксально ни звучало, но в их число входят даже природоохранные мероприятия, цель которых – изменить параметры среды. Довольно часто человек производит попытки стабилизации нарушенных сред, но недостаточно всесторонне, так как в основном опирается лишь на определенный перечень параметров, ограниченный полезным хозяйственным свойством. Идеальным вариантом, конечно же, будет отказ от любого рода деятельности, что по сути своей на данном этапе развития цивилизации невозможно.

На данный момент главным сдерживающим фактором при определении дальнейшего развития горнодобывающей промышленности

является экономический фактор [6], но кроме финансовой составляющей необходимо также учитывать нормативно-правовые и морально-этические аспекты. Совместный учет данных ограничений в настоящее время позволяет оценить вектор развития подводных горных работ, которые в будущем будут отвечать более современным экологическим требованиям и дадут возможность перехода от традиционных методов добычи на суше к подводным. Данный переход должен обеспечивать такой комплекс решений, как сохранение благоприятной окружающей среды и поддержание биологического разнообразия в совокупности с полной извлечением природных ресурсов для нынешнего и будущих поколений [7].

Цели данной работы – в ходе краткого анализа провести оценку экологического ущерба, причиняемого непосредственно при проведении подводных горных работ с помощью уже известных способов, а также с помощью предлагаемого способа, разработать математическую модель, построенную на результатах эксперимента, позволяющую определить необходимую массу льда для обеспечения транспортировки частицы полезного ископаемого со дна акватории в зависимости от ее массы.

Методы (Methods)

Методология исследования включала в себя следующий порядок действий:

- проведение литературного обзора существующих технологий подводной добычи твердых полезных ископаемых, с акцентом на их экологические аспекты;
- разработка принципиально новой технологии добычи твердых полезных ископаемых со дна акваторий, основанной на образовании грунтоледяных тел с помощью энергии холода, способствующей минимизации наносимого экологического ущерба по сравнению с известными технологиями;
- разработка экспериментальной модели – подбор материалов, определение технических характеристик оборудования и т. д.;
- проведение экспериментальных работ для подтверждения достоверности теоретических расчетов и проверки работоспособности технологии;
- анализ полученных результатов (экспериментальные данные представляли собой диаметр, объем и массу всплываемых грунтоледяных частиц), выявление зависимостей;



а) Обская губа, Россия



б) Пляж острова Хайлуото, Финляндия



в) Устье реки Везер, Германия

Рис. 1. Ледяные тела в природе [8–10]

Fig. 1. Ice bodies in nature [8–10]

– разработка универсальной математической модели на основе проведенных исследований.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Предлагаемое технологическое решение

Образование придонного (внутриводного) льда является известным природным явлением (Рис. 1) на водоемах северного полушария, которое возникает в зимний период при переохлаждении воды и при наличии в ней центров кристаллизации (взвешенные частицы донного грунта, льда, шуги или пузырьки воздуха).

На основе данного природного явления авторами представлен перспективный способ добычи со сниженным воздействием на окружающую среду с применением энергии холода при разработке подводных месторождений, расположенных в границах Арктического континентального шельфа с использованием специального устройства [11], которое состоит из следующих элементов: трубопровод для подачи хладагента с

выходными отверстиями и замкнутый контур, который в свою очередь может быть выполнен как из металла, так и из твердых или мягких полимеров. При этом предусматривается изоляция трубопровода и замкнутого контура, во-первых, для избежания процесса обледенения данных поверхностей на контактах с водой и, во-вторых, для предотвращения изменений температуры относительно естественного уровня в месте ведения работ.

Общий вид схемы оборудования по предложенному способу представлен на Рис. 2 и может быть описан следующим образом.

Судно размещает устройство добычи в контурах разрабатываемого подводного россыпного месторождения. Устройство устанавливается в вертикальном положении, таким образом, чтобы раструб замкнутого контура в основании накрывал участок толщи полезного ископаемого, планируемой к отработке.

После установки устройства начинается процесс добычи полезного ископаемого за счет

того, что с предусмотренного на судне хладагеногенератора производится подача под давлением хладагента по трубопроводу, который выходит в следующих местах:

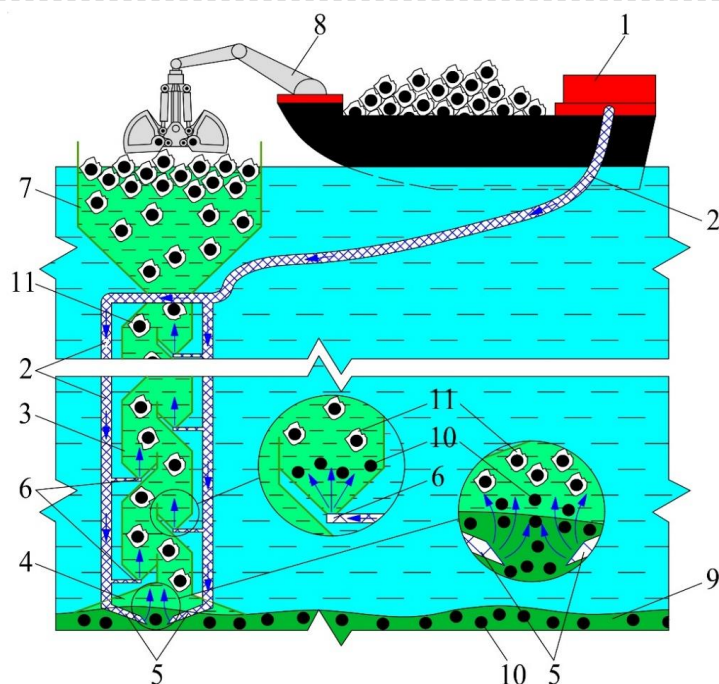
- в подводном забое под раструбом замкнутого контура, непосредственно из трубопровода;
- в замкнутом контуре из выходных отверстий.

В качестве хладагента может быть использован воздух с отрицательной температурой, который характерен для Арктических территорий.

За счет подачи хладагента в подводный забой частицы полезного ископаемого образуют взвесь в водной толще, а постоянная подача хладагента создает условия для формирования и последующего роста ледяного слоя вокруг взвешенных частиц полезного ископаемого, в результате чего происходит формирование грунтоледяных тел.

При нарастании определенного объема льда вокруг частицы полезного ископаемого и за счет разности плотностей льда с окружающей его водой грунтоледяные тела приобретают положительную плавучесть и начинают всплытие от дна до поверхности воды в замкнутом контуре.

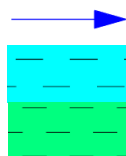
В процессе всплытия происходит уменьшение подъемной силы ледяной части грунтоледяных тел из-за ее таяния, что в свою очередь вызвано ее контактом с водой, имеющей положительную температуру. Вследствие этого грунтоледяное тело может потерять свою положительную плавучесть и не достигнуть водной поверхности. Для исключения данной ситуации и поддержания необходимого объема льда вокруг частицы полезного ископаемого и, следовательно, положительной плавучести грунтоледяных тел в процессе их всплытия в замкнутом контуре по всей его длине с определенным шагом предусмотрены выходные



*Обращаем ваше внимание, что рисунок выполнен не в масштабе и без соблюдения относительных размеров объектов на нем

- 1 – судно; 2 – трубопровод для подачи хладагента; 3 – замкнутый контур; 4 – раструб замкнутого контура;
 5 – выходные отверстия для хладагента в подводном забое; 6 – выходные отверстия для хладагента в замкнутом контуре; 7 – верхняя часть замкнутого контура; 8 – выемочное устройство;
 9 – толща полезного ископаемого; 10 – частица полезного ископаемого; 11 – грунтоледяное тело

Условные обозначения



– направление движения хладагента

– водная толща

– вода в замкнутом контуре

Рис. 2. Общий вид предлагаемой технологии добычи
 Fig. 2. General view of the proposed extraction technology

отверстия для хладагента.

Грунтоледяные тела, приближаясь к поверхности воды, попадают в верхнюю часть замкнутого контура, которая не имеет ограничения сверху для обеспечения доступа к рабочему органу выемочного устройства, установленного на судне. При этом верхняя часть замкнутого контура выполнена с высотой бортов, исключающих перемещение грунтоледяных тел за его периметр для избегания потерь полезного ископаемого.

В качестве выемочного устройства может быть использован гидравлический экскаватор с грейферным ковшом (Рис. 2), кран или экскаваторная установка типа «прямая лопата» по аналогии со штанговым земснарядом.

Вынимаемые грунтоледяные тела размещаются в трюме судна перед дальнейшей транспортировкой к месту переработки. При этом в трюме предусматривается система осушения для откачки воды, возникающей в процессе таяния ледяной части грунтоледяных тел.

Сравнительный анализ технологий подводной добычи по их негативному влиянию на экологию

При планировании добычных работ в море или океане должны учитываться условия их проведения не только с точки зрения горно-геологических условий, но и с учетом местной экосистемы, потому что и так немногочисленные сведения о биоте и среде их обитания слабо масштабируются на иные участки океана [12]. Экосистемы в суровых и глубоководных условиях могут быть охарактеризованы как уникальные за счет того, что в них обитают редкие виды организмов, нарушение среды которых может привести к катастрофическим последствиям для их популяции.

Однако область применения разработанной технологии, которая упомянута выше, ограничивается Арктической зоной Российской Федерации (далее – АЗРФ) и в теплых водах она будет низкоэффективной или вообще невозможной в реализации. Кроме этого, для шельфовых территорий АЗРФ характерны сравнительно небольшие глубины, в основном не превышающие 200 м [13, 14], в связи с чем вероятность возникновения катастрофических последствий в процессе ведения горных работ ниже, чем в более биоразнообразных южных акваториях. Тем не менее, полностью избежать экологического ущерба при проведении подводной добычи невозможно.

Необходимо принять во внимание, что мировой океан в настоящее время имеет слабую изученность [12, 15–18], о чем говорят небольшое наличие данных о биоразнообразии [12, 19], сложность при прогнозировании вреда после горных работ [12, 17, 20–22], слабое

понимание о степени восстановления биогеоценоза после горных работ [12, 17, 23] и неопределенность в выборе критериев, оценивающих допустимый уровень наносимого вреда [12, 24].

Также открытым остается вопрос о мерах поддержки численности и разнообразия сообществ организмов [25–27] при отсутствии подтвержденных и научно доказанных методов снижения вреда на биоту их среды обитания [18, 28, 29].

Оценка экологического ущерба должна производиться индивидуально для каждого объекта горных работ [18], в связи с этим в рамках данного исследования проводится сравнение количества возникающих негативных факторов для экологии в зависимости от способа подводной добычи, так как различные способы оказывают разное воздействие на окружающую среду. В качестве рассматриваемых способов принят ранее упомянутый с отнесением его к группе перспективных технологий, а также выделение группы существующих технологий, использующих: скреперные установки, земснаряды с грунтовыми насосами, многочерпаковые драги, грейферные снаряды, модифицированные земснаряды (эрлифты и эжекторы), подводные экскаваторы и автономные комплексы с открытым ковшом [30].

Негативное воздействие на окружающую среду может быть разделено относительно момента проведения горных работ, то есть на прямое (первичные негативные факторы), возникающее непосредственно в ходе ведения данных работ и характеризующиеся в относительно краткосрочном периоде, а также косвенное (вторичные негативные факторы), которое появляется в следствие антропогенного вмешательства с долгосрочным эффектом воздействия.

Следует также понимать, что первичные негативные факторы перестанут существовать с момента прекращения работ, в то время как вторичные негативные факторы начинают свое действие и развитие уже в момент работ.

Ниже представлен список первичных и вторичных негативных антропогенных факторов, возникающих в ходе ведения подводных работ, связанных с добычей полезных ископаемых и протекающих также после их окончания. Данный список составлен на основе анализа существующих исследований в данной области.

К первичным факторам негативного вреда отнесены:

- повышение концентрации мутности воды [2, 3, 19–22, 28, 31, 32];
- повышение шума и вибраций относительно естественного уровня [2, 3, 22, 28, 33–35];
- световое воздействие [12, 28, 36, 37];

- нарушение циклов развития и поведения организмов от шумового и светового воздействия [34–36];

- температурные изменения [20, 22, 38].

К вторичным же факторам негативного воздействия отнесены:

- нанесение вреда ранее неизвестным организмам [39–44];

- инвазия видов [28];

- эвтрофикация [32];

- весьма продолжительный период восстановления биогеоценоза [31, 44–46];

- нарушение способности к самовосстановлению [12, 47, 48];

- высокая степень воздействия на ранее разработанных участках, как следствие, продолжительный период восстановления [12, 44, 47];

- необратимые последствия – отсутствие вероятности восстановления среды до первоначального состояния [12, 23, 29, 31, 37, 44, 48];

- влияние как на жизненный цикл мелкой биоты, так и на долгоживущие организмы с продолжительным циклом полового созревания – вмешательство в цикл развития организмов [16, 31, 49–54];

- нарушение уникальных мест для осуществления важных этапов развития организмов [55, 56];

- нарушение ландшафта как навигационного фактора [57, 58];

- нарушение ландшафта как средообразующего фактора [21, 23, 28, 29, 31,

58–60];

- нанесение вреда многочисленным эндемикам с уникальными средами обитания [21, 42, 61–68];

- изменение видового состава [16, 47].

Обращаем внимание, что данный список факторов может меняться в зависимости от конкретных условий планируемых работ. Это связано с тем, что любое воздействие, оказываемое на окружающую среду, является комплексным вопросом, в связи с чем негативные факторы могут иметь пограничное положение при их различных попытках классифицировать, и в рамках данной работы были допущены некоторые упрощения.

Также необходимо учитывать, что степень влияния данных факторов зависит от глубины проведения работ, так как именно глубина является ключевым фактором, определяющим уровень ущерба, в связи с тем, что чем глубже располагается месторождение, тем слабее способность экосистемы к естественному восстановлению после вмешательства. Конечно, уникальные организмы могут обитать и на сравнительно небольших глубинах, но в основном прибрежные акватории, как правило, обладают большей способностью к самовосстановлению благодаря высокому биоразнообразию и менее сложным условиям обитания, что позволяет их экосистемам относительно быстро приходить в равновесие после нарушения. При этом с увеличением глубины упрощаются и экосистемы, которые могут страдать от последствий добычи гораздо

Таблица 1. Возникающие первичные негативные факторы по способам добычи
Table 1. Emerging primary negative factors by mining method

Фактор	Способ добычи с использованием							
	Скреперные установки	Земснаряды с грунтовыми насосами	Многочерпаковые драги	Грейферные снаряды	Эрлифты и эжекторы	Подводные экскаваторы	Автономные комплексы с открытым ковшом	Устройство для добычи с использованием хладагента в замкнутом контуре
Повышение концентрации взвеси	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
Повышение шума	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Световое воздействие с поверхности воды	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Световое воздействие на дне	-	-	-	-	-	✓	-	-
Нарушение циклов развития и поведения организмов	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Температурные изменения	-	-	-	-	-	✓	-	-
Количество возникающих факторов	4	4	4	4	4	6	4	3

дольше и сильнее, в связи с чем естественный цикл их восстановления замедляется.

Ранее перечисленные способы добычи, в том числе предлагаемые авторами, возможно сравнить по количеству возникающих первичных негативных факторов при их реализации (Таблица 1).

Как видно из Таблицы 1, при использовании способов добычи с подводными экскаваторами возникает наибольшее количество первичных негативных факторов, а у большинства других способов имеется совпадающий список факторов, состоящий из четырех и более единиц. При этом у предлагаемого способа добычи в рамках данной работы наблюдается наименьшее количество возникающих факторов, что делает ее сравнительно менее вредной по сравнению с остальными.

Данное преимущество достигается за счет исключения негативного фактора в виде повышения концентрации взвеси. Это возможно благодаря применению замкнутого контура (см. Рис. 2), в котором предусматривается добыча и транспортировка полезного ископаемого.

Кроме того, необходимо отметить, что предлагаемая технология будет иметь относительно низкое шумовое воздействие, так как предусмотренная подача хладагента, в качестве которого может выступать воздух с отрицательной температурой, создает эффект воздушно-пузырьковой завесы (ВПЗ), в результате чего происходит поглощение акустической энергии шума за счет резонансного рассеивания звука на воздушных пузырьках [69]. Исключение температурных изменений окружающей среды выполняется за счет изоляции трубопровода и замкнутого контура, как и говорилось ранее.

Помимо того, что предлагаемая технология является перспективной при ее экологической оценке, имеется проблема ее реализации в промышленных масштабах. Это связано с тем, что в настоящее время отсутствуют известные методики определения условий применения или критериев оценки эффективности горных работ с использованием предлагаемого способа добычи. В данной работе представлены результаты исследования, позволяющие продвинуться в направлении разработки методических рекомендаций по оценке применимости способа добычи твердых полезных ископаемых с образованием грунтоледяных тел для конкретных горно-геологических и климатических условий.

Теоретическая модель проводимого исследования

Физические процессы, на которых основываются способы добычи с образованием грунтоледяных тел, основываются на законах движения твердых тел в жидкости. На тело,

перемещающееся в жидкой среде, действуют следующие силы:

– *сила тяжести* или сила гравитации, действующая на ГЛТ и в подводном забое, и при его всплытии за счет того, что Земля притягивает все объекты, находящиеся на ее поверхности к своему центру

$$F_m = \frac{4r^3 g}{3}, \quad (1)$$

– *выталкивающая Архимедова сила* или в нашем случае это сила, которая будет осуществлять подъем ГЛТ от подводного забоя до поверхности акватории с усилием, равным весу жидкости, которое вытесняет ГЛТ

$$F_g = \frac{4r^3 \rho g}{3}, \quad (2)$$

– *сила сопротивления*, то есть сила, препятствующая свободному подъему ГЛТ при взаимодействии с жидкостью

$$F_c = 6rv, \quad (3)$$

где r – радиус частицы, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность жидкости, в которой перемещается грунтоледяное тело, кг/м³ [70]; v – теоретическая скорость всплытия ГЛТ, м/с.

Теоретическая скорость всплытия (отрицательная гидравлическая крупность) грунтоледяного тела, движущегося в водной толще с учетом вышеперечисленных сил, может быть определена следующим уравнением

$$v < \frac{2r^2 g (\rho - 1)}{9}. \quad (4)$$

Так, например, для оловянной частицы крупностью 6,5 мм: $v < 0,023$ м/с.

Ход эксперимента

С целью установления значений отрицательной гидравлической крупности частиц полезного ископаемого (в рамках опыта приняты оловянные дробинки) был произведен эксперимент по определению удельной массы льда и удельного его объема, позволяющего осуществить всплытие одного грамма частицы полезного ископаемого различной крупности.

При подготовке к непосредственному проведению опыта моделирующие частицы полезного ископаемого в виде оловянных дробинки классифицировались по диаметру с помощью электронного штангенциркуля, имеющего погрешность в 0,1 мм (данные значения представлены в столбце 1 Таблицы 2). После этого, с условием, что форма данных частиц близка к шарообразной, был определен их объем по формуле 5 (результаты данных расчетов представлены в столбце 2 Таблицы 2), а их масса определялась на аналитических весах с

погрешностью в 0,001 г (данные представлены в столбце 3 Таблицы 2).

Объем оловянных дробинok рассчитывался по следующей формуле

$$V_q = \frac{\pi}{6} \cdot D_q^3, \text{ мм}^3, \quad (5)$$

где D_q – диаметр частицы, мм.

Далее при помощи морозильной камеры производилось намораживание льда на

классифицированные частицы с условием, что объем ледяной части остается неизменным, а масса частицы в каждом последующем образце увеличивалась на 0,02 г.

Перед проведением эксперимента проводилось взвешивание образованных грунтоледяных тел также на аналитических весах с погрешностью в 0,001 г (данные представлены в столбце 4 Таблицы 2). Масса чистого льда, представленная в столбце 5

Таблица 2. Результаты проведенного эксперимента

Table 2. Results of the conducted experiment

Диаметр частицы, мм	Объем частицы, мм ³	Масса частицы, г	Масса грунтоледяного тела, г	Масса ледяной части, г
0,5	0,065	0,001	0,006	0,006
1,0	0,524	0,004	0,051	0,047
1,5	1,767	0,013	0,173	0,160
2,0	4,189	0,031	0,411	0,380
2,5	8,181	0,060	0,803	0,743
3,0	14,137	0,103	1,387	1,284
3,5	22,449	0,164	2,203	2,039
4,0	33,510	0,245	3,288	3,043
4,5	47,713	0,348	4,681	4,333
5,0	65,450	0,478	6,421	5,943
5,5	87,114	0,636	8,547	7,911
6,0	113,097	0,826	11,096	10,270
6,5	143,793	1,050	14,108	13,058
7,0	179,594	1,311	17,620	16,309
7,5	220,893	1,613	21,672	20,059
8,0	268,082	1,957	26,302	24,345
8,5	321,555	2,347	31,548	29,201
9,0	381,703	2,786	37,450	34,664
9,5	448,920	3,277	44,044	40,767
10,0	523,598	3,822	51,371	47,549

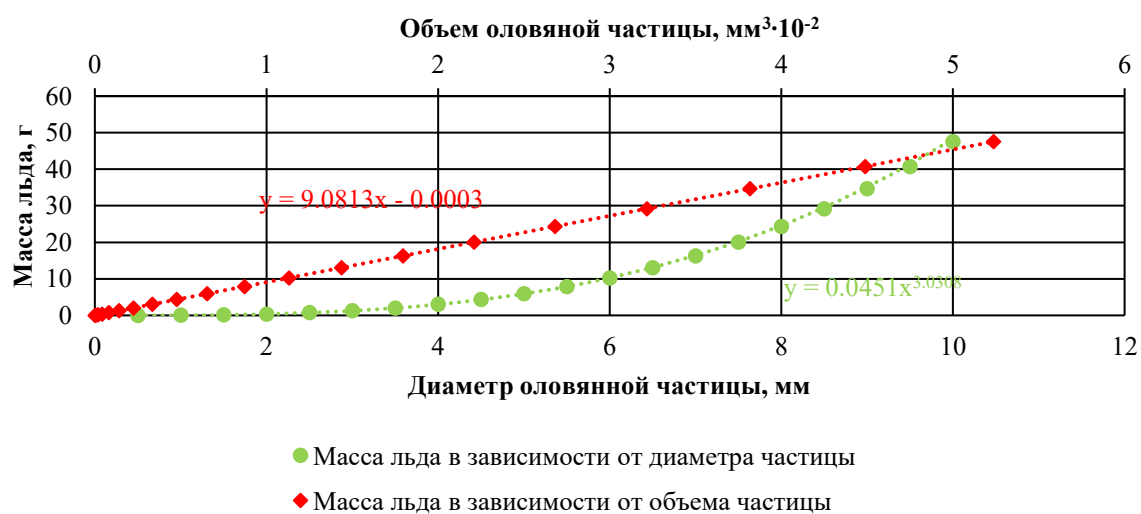


Рис. 3. Необходимая масса льда для всплывания грунтоледяного тела в зависимости от диаметра оловянной частицы и ее объема

Fig. 3. Required ice mass for soil-ice body surfacing depending on the diameter of the tin particle and its volume

Таблицы 2, вычислена аналитически за счет вычитания из массы грунтоледяных тел массы частиц.

После всего вышеуказанного действия производился непосредственно эксперимент, в ходе которого заготовленные грунтоледяные тела по одной штуке размещались на дне лабораторной емкости (21 л), наполненной водой с температурой, близкой к 3 °С, с параллельным ведением фиксации момента всплытия данных тел или отсутствия данного явления.

Таким образом, были зафиксированы необходимые условия для всплытия грунтоледяных тел, то есть граница, когда при неизменном объеме льда, но с уменьшением массы частицы полезного ископаемого с шагом в 0,02 г тело отрывалось от дна и поднималось к поверхности воды.

Обработка результатов проведенного эксперимента

По результатам экспериментов, проведенных по вышеописанной методологии, были получены данные, представленные в Таблице 2.

Для наглядного отображения экспериментальных данных на их основании были построены графики зависимости необходимой массы льда для всплытия грунтоледяного тела от параметров частицы полезного ископаемого (Рис. 3-4).

По данным на графике выше видно, что зависимость необходимой массы льда для всплытия от диаметра оловянной частицы нелинейная. И, например, увеличение диаметра оловянной частицы с 1,0 до 1,5 мм требует увеличения необходимой массы льда более чем в три раза, а при том же сравнении частиц диаметрами 9,5 и 10,0 мм масса льда должна быть больше лишь на 17%.

Линейная зависимость наблюдается между необходимой для всплытия массой льда и

объемом оловянной частицы (Рис. 3), где после увеличения объема оловянной частицы с 1,5 до 2,0 мм³ на каждое последующее увеличение данного параметра 0,5 мм³ необходимое увеличение количества льда, примерно равное 0,091 г.

Диаграмма выше также демонстрирует линейную зависимость, где после частиц полезного ископаемого с массой 0,06 г и далее на каждый грамм удельное количество необходимой массы льда почти не изменяется и составляет 12,4 г.

Одной из целей проводимого исследования является разработка методики, позволяющей оценить возможность или эффективность применения предлагаемой технологии в тех или иных условиях, но, так как эксперимент проводился только для частиц из олова, обладающих характерной этому материалу плотностью (примерно 7,31 г/см³), это накладывает ограничение на применимость результатов исследования, например, для золота, серебра или алмазов. По этой причине с целью создания универсального способа определения массы льда, которая позволит поднять к водной поверхности частицы той или иной массы из различного материала, на основании данных, представленных на Рис. 4, была построена следующая математическая модель

$$m_{\text{л}} = 12,442 \cdot m_{\text{ч}} - 0,0026, \text{ г}, \quad (6)$$

где, $m_{\text{ч}}$ — масса частицы полезного ископаемого, г.

Математическая модель, представленная выше, не зависит от геометрических параметров частицы полезного ископаемого, а, следовательно, может применяться для частиц с различными физико-механическими характеристиками, что делает ее универсальной в рассматриваемых условиях.

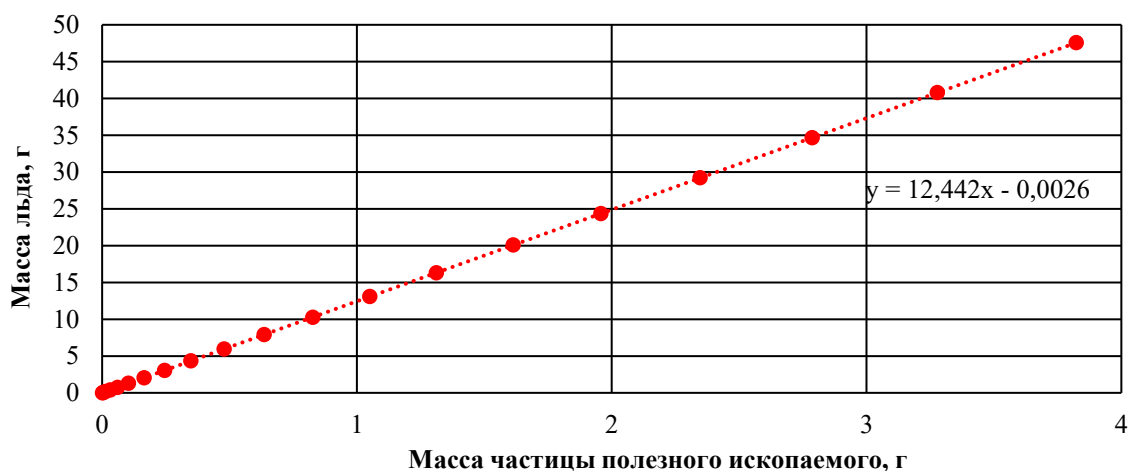


Рис. 4. Необходимая масса льда для всплытия грунтоледяного тела в зависимости от массы частицы полезного ископаемого

Fig. 4. Necessary ice mass for soil-ice body surfacing depending on the mass of the mineral particle

Заключение (Conclusion)

Принимая во внимание, что одним из направлений при реализации Стратегии развития АЗРФ до 2035 г. [71] является развитие минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых Республик Коми и Саха (Якутия), Мурманской области и Ненецкого автономного округа, можно сказать, что разработка новых технологий, позволяющих организовать эффективную добычу с Арктического шельфа, является актуальным направлением.

Именно наличие технологий добычи твердых полезных ископаемых с шельфа для суровых условий Арктики с обоснованными критериями и условиями использования даст прямую возможность в практическом смысле геологического изучения с последующей постановкой на баланс запасов и их разработкой крупными недропользователями, в том числе в лице государства.

Приведенные в данной работе результаты эксперимента и построенная на их основе математическая модель определения необходимой массы льда для всплытия грунтоледяного тела являются неотъемлемой частью при обосновании технической реализации и экономической эффективности разработанной технологии, которая по сравнению с уже известными наносит меньшее количество негативных последствий окружающей среде, что также является важным вопросом уже сейчас и тем более в будущем, так как в мировой практике для горнодобывающих компаний при оценке целесообразности освоения того или иного месторождения экологические факторы стоят на равном уровне с экономическими или даже выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Häder D. P., Banaszak A. T., Villafañe V. E., Narvarte M. A., González R. A., Helbling E. W. Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications // *Sci Total Environ*. 2020. Vol. 713. P. 136586. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136586.
2. Nath B. N., Khadge N. H., Nabar S. Monitoring the sedimentary carbon in an artificially disturbed deep-sea sedimentary environment // *Environ Monit Assess*. 2012. Vol. 184. P. 2829. DOI: 10.1007/s10661-011-2154-z.
3. Le J. T., Levin L. A., Carson R. T. Incorporating ecosystem services into environmental management of deep-seabed mining // *Deep Sea Res Part 2: Topical Studies in Oceanography*. 2017. Vol. 137. P. 486–503. DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.08.007.
4. Martin W., Baross J., Kelley D., Russell M. J. Hydrothermal vents and the origin of life // *Nat Rev Microbiol*. 2008. Vol. 6. P. 805–814. DOI: 10.1038/nrmicro1991.
5. Román-Palacios C., Moraga-López D., Wiens J. J. The origins of global biodiversity on land, sea and freshwater // *Ecol Lett*. 2022. Vol. 25. № 6. P. 1376–1386. DOI: 10.1111/ele.13999.
6. 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.
7. Кургузиков М. С., Петри В. А. Об экологических правах будущих поколений // *Российское право: образование, практика, наука*. 2021. № 6. С. 79–84. DOI: 10.34076/2410_2709_2021_6_79.
8. Ледяные шары на Ямале // *RT на русском*. URL: <https://russian.rt.com/foto/330325-ledyanie-shary-na-yamale> (дата обращения: 15.12.2024).
9. Thousands of rare 'ice eggs' have appeared on a beach in northern Finland // *Arctic Today*. URL: <https://www.arctictoday.com/thousands-of-rare-ice-eggs-have-appeared-on-a-beach-in-northern-finland/> (accessed: 15 December 2024).
10. Correspondence // *Alfred Wegener Institute*. URL: <https://epic.awi.de/id/eprint/8496/1/Eis2003d.pdf> (accessed: 15 December 2024).
11. Патент № 2549648 С1 Российская Федерация, МПК E21C 50/00. Устройство для добычи полезных ископаемых со дна континентального шельфа. № 2014112173/03. Заявлено: 28.03.2014. Опубл.: 27.04.2015.
12. Miller K. A., Thompson K. F., Johnston P., Santillo D. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps // *Front Mar Sci*. 2018. Vol. 4. P. 418. DOI: 10.3389/fmars.2017.00418.
13. Арктический шельф – кладовая за семью замками // *ISGuru*. URL: <https://isguru.ru/stati/vodosnabzhenie-i-vodootvedenie/6084-arkticheskij-shelf-kladovaya-zasemyu> (дата обращения: 08.12.2024).
14. Добрецов В. Б., Воробьев О. Г., Маковский А. Н. Проблемы и перспективы освоения месторождений полезных ископаемых Арктического шельфа. Северодвинск : Типография ГУП «ПО «Северное машиностроительное предприятие», 1997. 122 с.
15. Tyler P. A., German C. R., Ramirez-Llodra E., Van Dover C. L. Understanding the biogeography of chemosynthetic ecosystems // *Oceanol Acta*. 2003. Vol. 25. P. 227–241. DOI: 10.1016/S0399-1784(02)01202-1.
16. Ramirez-Llodra E. Z., Brandt A., Danovaro R. [et al.] Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7. P. 2851–2899. DOI: 10.5194/bg-7-2851-2010.
17. Hilário A., Metaxas A., Gaudron S. [et al.] Estimating dispersal distance in the deep sea: challenges and applications to marine reserves // *Front Mar Sci*. 2015. Vol. 2. P. 6. DOI: 10.3389/fmars.2015.00006.
18. Van Dover C. Tighten regulations on deep-sea mining // *Nature*. 2011. Vol. 470. P. 31–33. DOI: 10.1038/470031a.
19. Boschen R. E., Rowden A. A., Clark M. R., Gardner J. P. A. Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: a review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks, and management strategies // *Ocean Coast Manage*. 2013. Vol. 84. P. 54–67. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2013.07.005.
20. Drazen J. C., Smith C. R., Gjerde K. M. [et al.]

Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2020. Vol. 117. № 30. P. 17455–17460. DOI: 10.1073/pnas.2011914117.

21. Van Dover C. L. Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: what is at risk? // *ICES J Mar Sci.* 2010. Vol. 68. P. 341–348. DOI: 10.1093/icesjms/fsq086.

22. Bashir M. B., Kim S. H., Kiosidou E., Wolgamot H., Zhang W. A Concept for seabed Rare Earth Mining in the Eastern South Pacific // *LRET Collegium*. 2012. Vol. 1.

URL: https://www.southampton.ac.uk/assets/imported/transform/s/content-block/UsefulDownloads_Download/7C8750BCBBB64FBAAF2A13C4B8A7D1FD/LRET%20Collegium%202012%20Volume%201.pdf.

23. Clark M. R., Althaus F., Schlacher T. A. [et al.] The impacts of deep-sea fisheries on benthic communities: a review // *ICES J Mar Sci.* 2016. Vol. 73. P. 151–169. DOI: 10.1093/icesjms/fsv123.

24. Wedding L. M., Reiter S. M., Smith C. R. [et al.] Managing mining of the deep seabed // *Science*. 2015. Vol. 349. P. 144–145. DOI: 10.1126/science.aac6647.

25. McCauley D. J., Pinsky M. L., Palumbi S. R. [et al.] Marine defaunation: animal loss in the global ocean // *Sci-ence*. 2015. Vol. 347. P. 1255641. DOI: 10.1126/science.1255641.

26. O'Leary B. C., Winther-Janson M., Bainbridge J. M., et al. Effective coverage targets for ocean protection // *Conserv Lett.* 2016. Vol. 9. P. 398–404. DOI: 10.1111/conl.12247.

27. Roberts C.M., O'Leary B.C., McCauley D.J. [et al.] Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change // *Proc Natl Acad Sci USA*. 2017. Vol. 114. P. 6167–6175. DOI: 10.1073/pnas.1701262114.

28. Van Dover C. L. Impacts of anthropogenic disturbances at deep-sea hydrothermal vent ecosystems: a review // *Mar Environ Res.* 2014. Vol. 102. P. 59–72. DOI: 10.1016/j.marenvres.2014.03.008.

29. Van Dover C.L., Ardron J.A., Escobar E. [et al.] Biodiversity loss from deep-sea mining // *Nat Geosci.* 2017. Vol. 10. P. 464–465. DOI: 10.1038/ngeo2983.

30. Дробаденко В. П., Калинин И. С., Малухин Н. Г. Методика и техника морских геологоразведочных и горных работ. Волгоград : Издательский Дом «Ин-Фолио», 2010. 352 с.

31. Gollner S., Kaiser S., Menzel L. [et al.] Resilience of benthic deep-sea fauna to mining activities // *Mar Environ Res.* 2017. Vol. 129. P. 76–101. DOI: 10.1016/j.marenvres.2017.04.010.

32. Helmons R. L. J., de Wit L., de Stigter H., Spearman J. Dispersion of Benthic Plumes in Deep-Sea Mining: What Lessons Can Be Learned From Dredging? // *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. Article 868701. DOI: 10.3389/feart.2022.868701.

33. Stocker M. Fish, mollusks and other sea animals' use of sound, and the impact of anthropogenic noise in the marine acoustic environment // *J Acoust Soc Am*. 2002. Vol. 112. P. 2431–2457. DOI: 10.1121/1.4779979.

34. Gomez C., Lawson J. W., Wright A. J. [et al.] A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: the disparity between science and policy // *Can J Zool*. 2016. Vol. 94. P. 801–819. DOI:

10.1139/cjz-2016-0098.

35. Nedelec S. L., Radford A. N., Pearl L. [et al.] Motorboat noise impacts parental behaviour and offspring survival in a reef fish // *Proc R Soc B Biol Sci*. 2017. Vol. 284. Article 20170143. DOI: 10.1098/rspb.2017.0143.

36. Troy J. R., Holmes N. D., Veech J. A., Green M. C. Using observed seabird fallout records to infer patterns of attraction to artificial light // *Endang Species Res.* 2013. Vol. 22. P. 225–223. DOI: 10.3354/esr00547.

37. Herring P., Gatlen E., Shelton P. Are vent shrimps blinded by science? // *Nature*. 1999. Vol. 398. P. 116. DOI: .

38. Steiner R. Independent Review of the Environmental Impact Statement for the proposed Nautilus Minerals Solwara 1 Seabed Mining Project, Papua New Guinea. Bismarck-Solomon Indigenous Peoples Council, 2009.

39. Ramirez-Llodra E., Tyler P. A., Baker M.C. [et al.] Man and the last great wilderness: human impact on the deep sea // *PLoS ONE*. 2011. Vol. 6. Article e22588. DOI: 10.1371/journal.pone.0022588.

40. Thompson K., Baker C. S., Van Helden A. [et al.] The world's rarest whale // *Curr Biol*. 2012. Vol. 22. P. R905–R906. DOI: 10.1016/j.cub.2012.08.055.

41. Dalebout M. L., Scott Baker C., Steel D. [et al.] Resurrection of *Mesoplodon hotaula* Deraniyagala 1963: a new species of beaked whale in the tropical Indo-Pacific // *Mar Mamm Sci*. 2014. Vol. 30. P. 1081–1108. DOI: 10.1111/mms.12113.

42. Thatje T., Marsh L., Roterman C. [et al.] Adaptations to hydrothermal vent life in *Kiwa tyleri*, a new species of yeti crab from the East Scotia Ridge, Antarctica // *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10. Article e0127621. DOI: 10.1371/journal.pone.0127621.

43. Araya J. F. New records of deep-sea sea spiders (Chelicerata: Pycnogonida) in the southeastern Pacific // *Mar Biodiv*. 2016. Vol. 46. P. 725. DOI: 10.1007/s12526-015-0416-7.

44. Vanreusel A., Hilario A., Ribeiro P. A. [et al.] Threatened by mining, polymetallic nodules are required to pre-serve abyssal epifauna // *Sci Rep*. 2016. Vol. 6. Article 26808. DOI: 10.1038/srep26808.

45. Halbach P., Marchig V., Scherhag C. Regional variations in Mn, Ni, Cu, and Co of ferromanganese nodules from a basin in the Southeast Pacific // *Mar Geol*. 1980. Vol. 38. P. M1–M9. DOI: 10.1016/0025-3227(80)90001-8.

46. Miljutin D., Miljutina M., Arbizu P., Galéron J. Deep-sea nematode assemblage has not recovered 26 years after experimental mining of polymetallic nodules (Clarion-Clipperton Fracture Zone, Tropical Eastern Pacific) // *Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap*. 2011. Vol. 58. P. 885–897. DOI: 10.1016/j.dsr.2011.06.003.

47. Jones D. O. B., Kaiser S., Sweetman A. K. [et al.] Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining // *PLoS ONE*. 2017. Vol. 12. Article e0171750. DOI: 10.1371/journal.pone.0171750.

48. JPI Oceans. The Ecological Impact of Deep-Sea-Mining. 2016. URL: <https://jpio-miningimpact.geomar.de/home> (дата обращения: 08.12.2024).

49. Neilsen J., Hedeholm R. B., Heinemeier J. [et al.] Eye lens radiocarbon reveals centuries of longevity in the

Greenland shark (*Somniosus microcephalus*) // Science. 2016. Vol. 353. P. 702–704. DOI: 10.1126/science.aaf1703.

50. Carreiro-Silva M., Andrews A., Braga-Henriques A. [et al.] Variability and growth of long-lived black coral *Leio-pathes* sp. from the Azores // Mar Ecol Prog Ser. 2013. Vol. 473. P. 189–199. DOI: 10.3354/meps10052.

51. Clark M. R., Tittensor D. P. An index to assess the risk to stony corals from bottom trawling on seamounts // Mar Ecol. 2010. Vol. 31. P. 200–211. DOI: 10.1111/j.1439-0485.2010.00392.x.

52. Fallon S. J., Thresher R. E., Adkins J. Age and growth of the cold-water scleractinian *Solenosmilia variabilis* and its reef on SW Pacific seamounts // Coral Reefs. 2014. Vol. 33. P. 31–38. DOI: 10.1007/s00338-013-1097-y.

53. Watling L., Auster P. J. Seamounts on the high seas should be managed as vulnerable marine ecosystems // Front Mar Sci. 2017. Vol. 4. Article 14. DOI: 10.3389/fmars.2017.00014.

54. Rodrigues N., Sharma R., Nagender Nath B. Impact of benthic disturbance on megafauna in Central Indian Basin // Deep Sea Res Part II Top Stud Oceanogr. 2001. Vol. 48. P. 3411–3426. DOI: 10.1016/S0967-0645(01)00049-2.

55. Garrigue C., Clapham P.J., Geyer Y. [et al.] Satellite tracking reveals novel migratory patterns and the importance of seamounts for endangered South Pacific humpback whales // R Soc Open Sci. 2015. Vol. 2. Article 150489. DOI: 10.1098/rsos.150489.

56. Morato T., Miller P. I., Dunn D. C. [et al.] A perspective on the importance of oceanic fronts in promoting aggregation of visitors to seamounts // Fish and Fisheries. 2016. Vol. 17. P. 1227–1233. DOI: 10.1111/faf.12126.

57. Reisinger R. R., Keith M., Andrews R. D., de Bruyn P. J. N. Movement and diving of killer whales (*Orcinus orca*) at a Southern Ocean archipelago // J Exp Mar Biol Ecol. 2015. Vol. 473. P. 90–102. DOI: 10.1016/j.jembe.2015.08.008.

58. Yesson C., Clark M. R., Taylor M. L., Rogers A. D. The global distribution of seamounts based on 30 arc sec-onds bathymetry data // Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap. 2011. Vol. 58. P. 442–453. DOI: 10.1016/j.dsr.2011.02.004.

59. Koslow J. A., Gowlett-Holmes K., Lowry J. K. [et al.] Seamount benthic macrofauna off southern Tasmania: community structure and impacts of trawling // Mar Ecol Prog Ser. 2001. Vol. 213. P. 111–125. DOI: 10.3354/meps213111.

60. Levin L. A., Mengerink K., Gjerde K. M. [et al.] Defining “serious harm” to the marine environment in the context of deep-seabed mining // Mar Pol. 2016. Vol. 74. P. 245–259. DOI: 10.1016/j.marpol.2016.09.032.

61. Ramirez-Llodra E., Shank T. M., German C. R. Biodiversity and biogeography of hydrothermal vent species: Thirty years of discovery and investigations // Oceanography. 2007. Vol. 20. P. 30–41. DOI: 10.5670/oceanog.2007.78.

62. Van Dover C. L., German C. R., Speer K. G. [et al.] Evolution and biogeography of deep-sea vent and seep invertebrates // Science. 2002. Vol. 295. P. 1253–1257. DOI: 10.1126/science.1067361.

63. Thurber A. R., Jones W. J., Schnabel K. Dancing for food in the deep sea: bacterial farming by a new species of yeti crab // PLoS ONE. 2011. Vol. 6. Article e26243. DOI: 10.1371/journal.pone.0026243.

64. Rouse G., Wilson N., Carvajal J., Vrijenhoek R. New deep-sea species of *Xenoturbella* and the position of *Xenacoelomorpha* // Nature. 2016. Vol. 530. P. 94–97. DOI: 10.1038/nature16545.

65. Goffredi S. K., Johnson S., Tunnicliffe V. [et al.] Hydrothermal ventfields discovered in the southern Gulf of California clarify role of habitat in augmenting regional diversity // Proc R Soc B Biol Sci. 2017. Vol. 284. Article 20170817. DOI: 10.1098/rspb.2017.0817.

66. Rowden A.A., Schlacher T.A., Williams A. [et al.] A test of the seamount oasis hypothesis: seamounts support higher epibenthic megafaunal biomass than adjacent slopes // Mar Ecol. 2010. Vol. 31. P. 95–106. DOI: 10.1111/j.1439-0485.2010.00369.x.

67. Tilot V. Biodiversity and Distribution of the Megafauna. Vol. 69. UNESCO, 2006. URL: <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001495/149556e.pdf>.

68. Thiel H., Schriever G., Bussau C., Borowski C. Manganese nodule crevice fauna // Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap. 1993. Vol. 40. P. 419–423. DOI: 10.1016/0967-0637(93)90012-R.

69. Кузнецов М. Ю. Способ снижения подводного шума судна при проведении траловых и тралово-акустических учетных съемок // Известия ТИНРО. 2011. № 167. С. 223–233.

70. Ревинская О. Г. Движение тела в вязкой среде. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 22 с.

71. ConsultantPlus. Законодательная база Российской Федерации. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366065/ (дата обращения: 08.12.2024).

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Цимбалюк Николай Александрович, ведущий инженер АО «Прииск Удерецкий» (660028, Россия, г. Красноярск, ул. Телевизорная, 1 ст. 14). ORCID 0000-0001-5593-6701, e-mail: Tsimbalyuk@ro.ru.

Кисляков Виктор Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры открытых горных работ, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660025, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95). ORCID 0000-0003-0297-2893, e-mail: vkislyakov@sfu-kras.ru.

Катышев Павел Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры открытых горных работ, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660025, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95). ORCID 0009-0003-5249-5965, e-mail: PKatyshev@sfu-kras.ru.

Тагиров Ризван Ризванулаевич, ведущий эколог ООО «НТЦ «Геотехнология», (660037, Россия, г. Красноярск, ул. Мичурина, 2ж). ORCID 0009-0007-8964-1224, e-mail: trr.science@yandex.ru.

Кирсанов Александр Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры шахтного и подземного строительства, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (660025, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. «Красноярский рабочий», 95). ORCID 0000-0001-7977-4954, e-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru

Заявленный вклад авторов:

Цимбалюк Николай Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Кисляков Виктор Евгеньевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы.

Катышев Павел Викторович – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, написание текста.

Тагиров Ризван Ризванулаевич – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных, написание текста.

Кирсанов Александр Константинович – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

PERSPECTIVES OF COLD ENERGY UTILISATION FOR EXTRACTION OF SOLID SHELF MINERALS TAKING INTO ACCOUNT ENVIRONMENTAL ASPECTS

Nikolay A. Tsimbalyuk ^{1*}, Victor E. Kislyakov ²,
Pavel V. Katyshev ², Rizvan R. Tagirov ³,
Aleksandr K. Kirsanov ²

¹ Priisk Udereyskiy

² Siberian Federal University

³ ООО STC Geotechnology

* for correspondence: tsimbalyuk@ro.ru



Article info

Received:

23 January 2025

Accepted for publication:

22 September 2025

Accepted:

30 September 2025

Published:

23 October 2025

Keywords: Subsea mining, Arctic, shelf, ecology, deep-sea ecosystems, negative factors, soil-ice body, refrigerant,

Abstract.

The mining industry is one of the sources of negative impact on the environment, both during the immediate operations and after the completion of operations. The assessment of negative impacts on flora and fauna is also mandatory for the development of solid mineral deposits located on the seabed, which entails restrictions for this type of activity. In addition, the maximum possible depth of development of existing technologies and the possibility of their application in harsh climatic conditions characterised by low temperatures and prolonged ice cover act as limitations. In this paper the authors proposed a promising technology for the development of such deposits on the Arctic shelf using cold energy, which allows to organise the process of extraction and transportation of minerals with the help of soil-ice bodies, which in comparison with already known methods entails a smaller number of factors that have a negative impact on the environment. Justification of the possibility of application of this technology on an industrial scale consists in determination of conditions of its operability and efficiency in those or other conditions, for what purpose the experiment with modelling of the process of surfacing of soil-ice bodies from the bottom to the water surface was made. Based on the results of this experiment, a mathematical model was developed to determine the necessary amount of ice

mathematical model.

in the soil-ice body to organise the surfacing process. The performed researches bring closer the possibility of practical application of the proposed technology, which makes it possible to use the negative ambient temperature as a technological medium to reduce the specific costs of transport and provides for the reduction of environmental impact.

For citation: Tsimbalyuk N.A., Kislyakov V.E., Katyshev P.V., Tagirov R.R., Kirsanov A.K. Perspectives of cold energy utilisation for extraction of solid shelf minerals taking into account environmental aspects. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 5(171):147-162. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-5-147-162, EDN: QVTHPC

REFERENCES

1. Häder D.P., Banaszak A.T., Villafañe V.E., Narvarte M.A., González R.A., Helbling E.W. Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications. *Science of the Total Environment*. 2020; 713:136586. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136586.
2. Nath B.N., Khadge N.H., Nabar S. Monitoring the sedimentary carbon in an artificially disturbed deep-sea sedimentary environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012; 184:2829. DOI: 10.1007/s10661-011-2154-z.
3. Le J.T., Levin L.A., Carson R.T. Incorporating ecosystem services into environmental management of deep-seabed mining. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017; 137:486–503. DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.08.007.
4. Martin W., Baross J., Kelley D., Russell M.J. Hydrothermal vents and the origin of life. *Nature Reviews Microbiology*. 2008; 6:805–814. DOI: 10.1038/nrmicro1991.
5. Román-Palacios C., Moraga-López D., Wiens J.J. The origins of global biodiversity on land, sea and freshwater. *Ecology Letters*. 2022; 25(6):1376–1386. DOI: 10.1111/ele.13999.
6. Kirsanov A.K., Katyshev P.V. Economic drivers of seabed mining. *Izvestiya Vuzov. Gomy Zhurnal*. 2024; 1:20–26. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-1-20-26.
7. Kurguzikov M.S., Petri V.A. On the environmental rights of future generations. *Rossiiskoe Pravo: Obrazovanie, Praktika, Nauka*. 2021; 6:79–84. DOI: 10.34076/2410_2709_2021_6_79.
8. Ice spheres in Yamal. Available at: <https://russian.rt.com/foto/330325-ledyanie-shary-na-yamale>. (accessed 15 December 2024).
9. Thousands of rare 'ice eggs' have appeared on a beach in northern Finland. Available at: <https://www.arctictoday.com/thousands-of-rare-ice-eggs-have-appeared-on-a-beach-in-northern-finland/>. (accessed 15 December 2024).
10. Correspondence. Available at: <https://epic.awi.de/id/eprint/8496/1/Eis2003d.pdf>. (accessed 15 December 2024).
11. Patent No. 2549648 C1 Russian Federation, IPC E21C 50/00. Device for mining minerals from the continental shelf bottom. No. 2014112173/03. Filed 2014 Mar 28. Published 2015 Apr 27.
12. Miller K.A., Thompson K.F., Johnston P., Santillo D. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps. *Frontiers in Marine Science*. 2018; 4:418. DOI: 10.3389/fmars.2017.00418.
13. Arctic shelf – a treasure trove under seven locks. Available from: <https://isguru.ru/stati/vodosnabzhenie-i-vodootvedenie/6084-arkticheskij-shelf-kladovaya-za-semyu> [Accessed 2024 Dec 08].
14. Dobretsov V.B., Vorobyev O.G., Makovsky A.N. Problems and prospects of developing mineral deposits on the Arctic shelf. Severodvinsk: Printing house of GUP "PO "Northern Machine-Building Enterprise"; 1997. 122 p. (In Russ.).
15. Tyler P.A., German C.R., Ramirez-Llodra E., Van Dover C.L. Understanding the biogeography of chemosynthetic ecosystems. *Oceanologica Acta*. 2003; 25:227–241. DOI: 10.1016/S0399-1784(02)01202-1.
16. Ramirez-Llodra E.Z., Brandt A., Danovaro R. [et al.] Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem. *Biogeosciences*. 2010; 7:2851–2899. DOI: 10.5194/bg-7-2851-2010.
17. Hilário A., Metaxas A., Gaudron S. [et al.] Estimating dispersal distance in the deep sea: challenges and applications to marine reserves. *Frontiers in Marine Science*. 2015; 2:6. DOI: 10.3389/fmars.2015.00006.
18. Van Dover C. Tighten regulations on deep-sea mining. *Nature*, 2011; 470:31–33. DOI: 10.1038/470031a.
19. Boschen R.E., Rowden A.A., Clark M.R., Gardner J.P.A. Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: a review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks, and management strategies. *Ocean and Coastal Management*. 2013; 84:54–67. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2013.07.005.
20. Drazen J.C., Smith C.R., Gjerde K.M., et al. Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2020; 117(30):17455–17460. DOI: 10.1073/pnas.2011914117.
21. Van Dover C.L. Mining seafloor massive sulphides and biodiversity: what is at risk? *ICES Journal of Marine Science*. 2010; 68:341–348. DOI: 10.1093/icesjms/fsq086.
22. Bashir M.B., Kim S.H., Kiosidou E., Wolgamot H., Zhang W. A concept for seabed rare earth mining in the Eastern South Pacific. *LRET Collegium*. 2012; 1. Available at: https://www.southampton.ac.uk/assets/imported/transforms/block/UsefulDownloads_Download/7C8750BCBBB64FBAAF2A13C4B8A7D1FD/LRET%20Collegium%202012%20Volume%201.pdf.
23. Clark M.R., Althaus F., Schlacher T.A. [et al.] The impacts of deep-sea fisheries on benthic communities: a

review. *ICES Journal of Marine Science*. 2016; 73:151–169. DOI: 10.1093/icesjms/fsv123.

24. Wedding L.M., Reiter S.M., Smith C.R. [et al.] Managing mining of the deep seabed. *Science* 2015; 349:144–145. DOI: 10.1126/science.aac6647.

25. McCauley D.J., Pinsky M.L., Palumbi S.R. [et al.] Marine defaunation: animal loss in the global ocean. *Science*. 2015; 347:1255641. DOI: 10.1126/science.1255641.

26. O'Leary B.C., Winther-Janson M., Bainbridge J.M., et al. Effective coverage targets for ocean protection. *Conservation Letters*. 2016; 9:398–404. DOI: 10.1111/cons.12247.

27. Roberts C.M., O'Leary B.C., McCauley D.J. [et al.] Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017; 114:6167–6175. DOI: 10.1073/pnas.1701262114.

28. Van Dover C.L. Impacts of anthropogenic disturbances at deep-sea hydrothermal vent ecosystems: a review. *Marine Environmental Research*. 2014; 102:59–72. DOI: 10.1016/j.marenvres.2014.03.008.

29. Van Dover C.L., Ardron J.A., Escobar E. [et al.] Biodiversity loss from deep-sea mining. *Nature Geoscience*. 2017; 10:464–465. DOI: 10.1038/ngeo2983.

30. Drobachenko V.P., Kalinin I.S., Malukhin N.G. Methods and techniques for marine geological exploration and mining. Volgograd: In-Folio Publishing House; 2010. 352 p. (In Russ.).

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

32. Helmons R.L.J., de Wit L., de Stigter H., Spearman J. Dispersion of benthic plumes in deep-sea mining: What lessons can be learned from dredging? *Frontiers in Earth Science*. 2022; 10:868701. DOI: 10.3389/feart.2022.868701.

33. Stocker M. Fish, mollusks and other sea animals' use of sound, and the impact of anthropogenic noise in the marine acoustic environment. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2002; 112:2431–2457. DOI: 10.1121/1.4779979.

34. Gomez C., Lawson J.W., Wright A.J. [et al.] A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: The disparity between science and policy. *Canadian Journal of Zoology*. 2016; 94:801–819. DOI: 10.1139/cjz-2016-0098.

35. Nedelec S.L., Radford A.N., Pearl L. [et al.] Motorboat noise impacts parental behaviour and offspring survival in a reef fish. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2017; 284:20170143. DOI: 10.1098/rspb.2017.0143.

36. Troy J.R., Holmes N.D., Veech J.A., Green M.C. Using observed seabird fallout records to infer patterns of attraction to artificial light. *Endangered Species Research*. 2013; 22:225–223. DOI: 10.3354/esr00547.

37. Herring P., Gaten E., Shelton P. Are vent shrimps blinded by science? *Nature*. 1999; 398:116. DOI: 10.1038/18142.

38. Steiner R. Independent Review of the Environmental Impact Statement for the proposed Nautilus Minerals Solwara 1 Seabed Mining Project, Papua New

Guinea. Bismarck-Solomon Indigenous Peoples Council, 2009.

39. Ramirez-Llodra E., Tyler P.A., Baker M.C. [et al.] Man and the last great wilderness: Human impact on the deep sea. *PLoS ONE*. 2011; 6:e22588. DOI: 10.1371/journal.pone.0022588.

40. Thompson K., Baker C.S., Van Helden A., [et al.] The world's rarest whale. *Current Biology*. 2012; 22:R905–R906. DOI: 10.1016/j.cub.2012.08.055.

41. Dalebout M.L., Scott Baker C., Steel D., [et al.] Resurrection of *Mesoplodon hotaula* Deraniyagala 1963: A new species of beaked whale in the tropical Indo-Pacific. *Marine Mammal Science*. 2014; 30:1081–1108. DOI: 10.1111/mms.12113.

42. Thatje T., Marsh L., Roterman C. [et al.] Adaptations to hydrothermal vent life in *Kiwa tyleri*, a new species of yeti crab from the East Scotia Ridge, Antarctica. *PLoS ONE*. 2015; 10:e0127621. DOI: 10.1371/journal.pone.0127621.

43. Araya J.F. New records of deep-sea sea spiders (Chelicerata: Pycnogonida) in the southeastern Pacific. *Marine Biodiversity*. 2016; 46:725. DOI: 10.1007/s12526-015-0416-7.

44. Vanreusel A., Hilario A., Ribeiro P.A. [et al.] Threatened by mining, polymetallic nodules are required to preserve abyssal epifauna. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, article 26808. DOI: 10.1038/srep26808.

45. Halbach P., Marchig V., Scherhag C. Regional variations in Mn, Ni, Cu, and Co of ferromanganese nodules from a basin in the Southeast Pacific. *Marine Geology*. 1980; 38:M1–M9. DOI: 10.1016/0025-3227(80)90001-8.

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

47. Jones D.O.B., Kaiser S., Sweetman A.K. [et al.] Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining. *PLoS ONE*. 2017; 12:e0171750. DOI: 10.1371/journal.pone.0171750.

48. JPI Oceans. The ecological impact of deep-sea-mining. 2016. Available at: <https://jpi-o-miningimpact.geomar.de/home> (accessed 08 December 2024).

49. Neilsen J., Hedeholm R.B., Heinemeier J. [et al.] Eye lens radiocarbon reveals centuries of longevity in the Greenland shark (*Somniosus microcephalus*). *Science*. 2016; 353:702–704. DOI: 10.1126/science.aaf1703.

50. Carreiro-Silva M., Andrews A., Braga-Henriques A. [et al.] Variability and growth of long-lived black coral *Leiopathes* sp. from the Azores. *Marine Ecology Progress Series*. 2013; 473:189–199. DOI: 10.3354/meps10052.

51. Clark M.R., Tittensor D.P. An index to assess the risk to stony corals from bottom trawling on seamounts. *Marine Ecology*. 2010; 31:200–211. DOI: 10.1111/j.1439-0485.2010.00392.x.

52. Fallon S.J., Thresher R.E., Adkins J. Age and growth of the cold-water scleractinian *Solenosmilia variabilis* and its reef on SW Pacific seamounts. *Coral Reefs*. 2014; 33:31–38. DOI: 10.1007/s00338-013-1097-y.

53. Watling L., Auster P.J. Seamounts on the high seas should be managed as vulnerable marine ecosystems.

Frontiers in Marine Science. 2017; 4:14. DOI: 10.3389/fmars.2017.00014.

54. Rodrigues N., Sharma R., Nagender Nath B. Impact of benthic disturbance on megafauna in Central Indian Basin. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2001; 48:3411–3426. DOI: 10.1016/S0967-0645(01)00049-2.

55. Garrigue C., Clapham P.J., Geyer Y. [et al.] Satellite tracking reveals novel migratory patterns and the importance of seamounts for endangered South Pacific humpback whales. Royal Society Open Science. 2015; 2:article 150489. DOI: 10.1098/rsos.150489.

56. Morato T., Miller P.I., Dunn D.C. [et al.] A perspective on the importance of oceanic fronts in promoting aggregation of visitors to seamounts. Fish and Fisheries, 2016; 17:1227–1233. DOI: 10.1111/faf.12126.

57. Reisinger R.R., Keith M., Andrews R.D., de Bruyn P.J.N. Movement and diving of killer whales (Orcinus orca) at a Southern Ocean archipelago. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2015; 473:90–102. DOI: 10.1016/j.jembe.2015.08.008.

58. Yesson C., Clark M.R., Taylor M.L., Rogers A.D. The global distribution of seamounts based on 30 arc seconds bathymetry data. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2011; 58:442–453. DOI: 10.1016/j.dsr.2011.02.004.

59. Koslow J.A., Gowlett-Holmes K., Lowry J.K. [et al.] Seamount benthic macrofauna off southern Tasmania: community structure and impacts of trawling. Marine Ecology Progress Series. 2001; 213:111–125. DOI: 10.3354/meps213111.

60. Levin L.A., Mengerink K., Gjerde K.M. [et al.] Defining “serious harm” to the marine environment in the context of deep-seabed mining. Marine Policy. 2016; 74:245–259. DOI: 10.1016/j.marpol.2016.09.032.

61. Ramirez-Llodra E., Shank T.M., German C.R. Biodiversity and biogeography of hydrothermal vent species: Thirty years of discovery and investigations. Oceanography. 2007; 20:30–41. DOI: 10.5670/oceanog.2007.78.

62. Van Dover C.L., German C.R., Speer K.G. [et al.] Evolution and biogeography of deep-sea vent and seep invertebrates. Science. 2002; 295:1253–1257. DOI: 10.1126/science.1067361.

63. Thurber A.R., Jones W.J., Schnabel K. Dancing for food in the deep sea: bacterial farming by a new species of yeti crab. PLoS ONE. 2011; 6:e26243. DOI: 10.1371/journal.pone.0026243.

64. Rouse G., Wilson N., Carvajal J., Vrijenhoek R. New deep-sea species of Xenoturbella and the position of Xenacoelomorpha. Nature. 2016; 530:94–97. DOI: 10.1038/nature16545.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Nikolay A. Tsimbalyuk, Leading Engineer of the AO Priisk Uderejskij, (660028, Russian Federation, Krasnoyarsk, Televizornaya St., 1 st. 14). ORCID 0000-0001-5593-6701. E-mail: Tsimbalyuk@ro.ru

Victor E. Kislyakov, Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Surface Mining, Siberian Federal University, (660025, Russian Federation, Krasnoyarsk, Prospect imeni gazety “Krasnoyarsk rabochiy”, 95). ORCID 0000-0003-0297-2893. E-mail: VKislyakov@sfu-kras.ru

Pavel V. Katyshev, Candidate of Technical Science, Senior Lecturer of the Department of Surface Mining, Siberian Federal University, (660025, Russian Federation, Krasnoyarsk, Prospect imeni gazety “Krasnoyarsk rabochiy”, 95). ORCID 0009-0003-5249-5965. E-mail: PKatyshev@sfu-kras.ru

Rizvan R. Tagirov, Leading ecologist at OOO STC Geotechnology, (660037, Krasnoyarsk, Russian Federation, Michurina St., 2zh). ORCID 0009-0007-8964-1224. E-mail: trr.science@yandex.ru

Aleksandr K. Kirsanov, Candidate of Technical Science, Senior Lecturer of the Department of Mine and Underground Construction, Siberian Federal University, (660025, Russian Federation, Krasnoyarsk, Prospect imeni gazety “Krasnoyarsk rabochiy”, 95). ORCID 0000-0001-7977-4954. E-mail: AKirsanov@sfu-kras.ru

Contribution of the authors:

Nikolay A. Tsimbalyuk – research problem statement; scientific management, reviewing the relevant literature; conceptualisation of research, data collection, data analysis, reviewing the relevant literature, drawing the conclusions, writing the text.

Victor E. Kislyakov – research problem statement, scientific management, conceptualisation of research, drawing the conclusions.

Pavel V. Katyshev – reviewing the relevant literature, data collection and analysis, writing the text.

Rizvan R. Tagirov – reviewing the relevant literature, data collection and analysis, writing the text.

Aleksandr K. Kirsanov – reviewing the relevant literature, data collection and analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

