

ОТ ОТХОДОВ К ИНФРАСТРУКТУРЕ: СТРАТЕГИИ ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ БУРЕНИЯ В РАЗВИТИИ АРКТИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ СПГ

А. П. Лебедев, А. Е. Череповицын

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 8 августа 2025 г.

Для цитирования

Лебедев А. П., Череповицын А. Е. От отходов к инфраструктуре: стратегии циркулярной экономики для управления отходами бурения в развитии арктических проектов СПГ // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 2. — С. 224—237. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-224-237.

Актуальность исследования обусловлена развитием арктических проектов сжиженного природного газа, которое сопровождается генерацией значительного объема отходов. Их традиционное захоронение приводит к экологической нагрузке и высоким логистическим затратам, что требует внедрения циркулярных подходов. Цель работы — оценка экономической эффективности и рисков переработки буровых отходов в строительный материал для транспортной инфраструктуры арктических проектов. Предложены методы оценки эффективности и рисков: метод Монте-Карло, ГИС-моделирование, экономико-математическое и сценарное моделирование. Новизна исследования заключается в комплексном подходе, позволяющем количественно оценить экономическую эффективность и риски интеграции принципов циркулярной экономики в развитие транспортной инфраструктуры Арктики за счет переработки буровых отходов. Предложенные методы опробованы на месторождениях полуострова Ямал, где рассчитаны потенциальные объемы переработки отходов и экономический эффект от их использования.

Ключевые слова: промышленное освоение Арктики, циркулярная экономика, проекты СПГ, управление отходами, инфраструктура транспортная, месторождения углеводородов.

Введение

Освоение арктических регионов России, обладающих значительными запасами углеводородов, сопряжено с необходимостью реализации крупномасштабных промышленных проектов по сжижению природного газа на полуостровах Ямал и Гыдан (рис. 1) [1—3]. Данные проекты имеют стратегическое значение для Российской Федерации [4; 5]. Интенсивное развитие нефтегазового комплекса в этом регионе сопровождается генерацией значительного объема отходов бурения, который создает экологические и логистические вызовы [6—8]. Тра-

диционные методы обращения с отходами, такие как захоронение или закачка в подземные резервуары, не в полной мере соответствуют принципам устойчивого развития и требуют значительных финансовых затрат [9; 10].

Для арктических проектов, где транспорт строительных материалов может быть дорогим и облагаться дополнительными платежами, повышение стоимости местных отходов путем их переработки является многообещающим направлением устойчивого развития [11; 12]. В этом контексте реализация подобных проектов в нефтегазовой отрасли должна осуществляться на основе системных и адаптивных управленческих подходов [13—15].

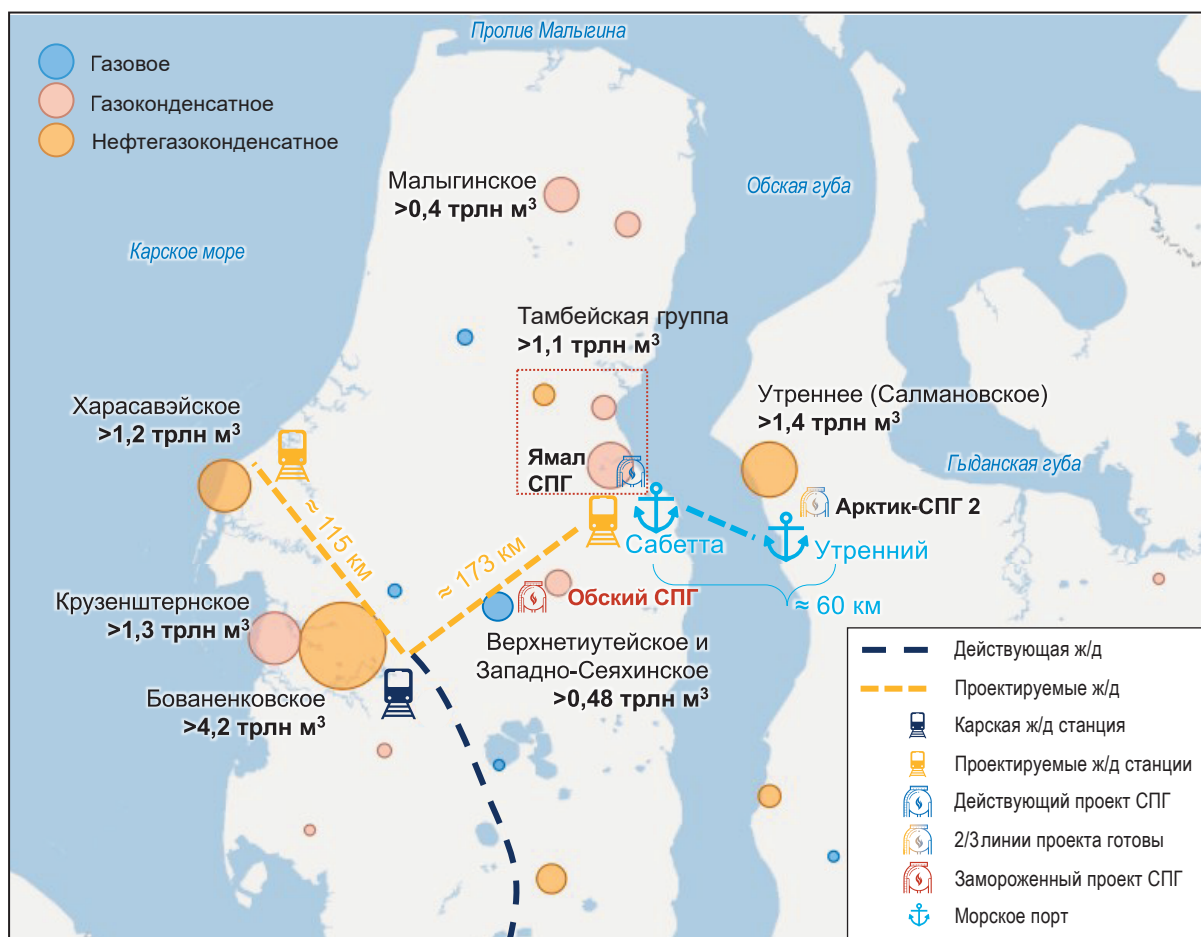


Рис. 1. Крупномасштабные промышленные проекты по сжижению природного газа, месторождения углеводородов и транспортные возможности Ямало-Гыданского региона. Составлено авторами по данным «Независимого нефтегазового портала. Месторождения нефти и газа» (<https://oilgasinform.ru/science/fields/>)

Fig. 1. Large-scale LNG projects, hydrocarbon fields and transportation capabilities of the Yamalo-Gydan region. Compiled by the authors based on data from the Independent Oil and Gas Portal. Oil and Gas Deposits (<https://oilgasinform.ru/science/fields/>)

В настоящее время в научной литературе активно обсуждаются вопросы применения принципов экономики замкнутого цикла (циркулярной экономики) для решения проблемы отходов [16—18]. Ряд исследований посвящен технологиям переработки бурового шлама в строительные материалы, такие как заполнители для бетона, дорожные покрытия и тротуарная плитка [19; 20]. Однако существующие работы часто носят фрагментарный характер и не предлагают комплексных моделей, позволяющих оценить экономическую эффективность и риски интеграции переработанных отходов в конкретные инфраструктурные проекты в условиях Арктики с учетом высокой неопределенности исходных данных.

Таким образом, научная проблема заключается в отсутствии методического подхода, позволяющего комплексно оценить экономическую эффективность и риски управления буровыми отходами на основе принципов циркулярной экономики для целей развития транспортной инфраструктуры арктических регионов.

Целью работы являются разработка и опробование методики оценки экономической эффективности и рисков использования переработанных буровых отходов для строительства дорожной инфраструктуры в условиях Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Решаются следующие задачи: анализ текущей практики обращения с отходами бурения в регионе, разработка экономико-математической модели, оценка экономического эффекта и анализ рисков с применением метода Монте-Карло, разработка практических рекомендаций.

Материалы и методы

Большая часть Ямало-Гыданского региона расположена в зоне вечной мерзлоты. Для предотвращения деформации дорожного полотна при сезонных изменениях температуры необходимо использовать специальные методы стабилизации грунтов [21]. Изменение климата приводит к деградации многолетнемерзлых пород (ММП) (криолитозоны), что негативно сказывается на устойчивости оснований дорог, увеличивая расходы на ремонт

Таблица 1. Варианты утилизации отходов бурения в условиях Ямало-Гыданского региона
Table 1. Options for disposal of drilling waste in the Yamalo-Gydan region

Способ утилизации	Краткое описание	Источник
1. Захоронение в шламовых амбарах (шламонакопителях)	Размещение отходов бурения в специальных ямах — шламовых амбарах	[9]
2. Передача отходов компаниям	Передача отходов компаниям, имеющим лицензию на утилизацию отходов	[26]
3. Стабилизация отходов бурения	Придание отходам бурения однородной консистенции и вывоз с месторождения	Банк данных о технологиях утилизации и обезвреживания отходов различных видов *
4. Термическая утилизация	Уничтожение отходов в камере сжигания при температуре 850—900°C	[27]
5. Закачка отходов в ММП	Размещение отходов бурения в мерзлых песчаных грунтах	[28—30]
6. Переработка отходов бурения	Получение щебня, гравия, грунта для дальнейшего использования в рекультивации земель, строительстве и ремонте кустовых площадок, дорог	[19; 31—33]

* Росприроднадзор. Банк данных о технологиях утилизации и обезвреживания отходов различных видов. — URL: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/kadastr/bdtu/>.

и обслуживание объектов транспортной инфраструктуры, поэтому необходимы ресурсы местного значения для строительства дорог [22]. Вдобавок к этому своевременный ремонт дорог, пролегающих на поверхностях ММП, может предотвратить аварийные ситуации [23].

Климатические условия и транспортная связанность рассматриваемого региона создают серьезные вызовы в обращении с отходами бурения нефтяных и газовых скважин [24]. Поскольку транспортировать буровые отходы на дальние расстояния совершенно неэффективно (в удаленных регионах стоимость транспортировки отходов может достигать 230 долл. за тонну [25]), пользователи недр применяют такие методы, при которых утилизация отходов происходит на месте их возникновения (табл. 1).

Согласно Реестру объектов размещения отходов¹, в ЯНАО на январь 2025 г. зарегистрировано 72 объекта, из них 37 полигонов твердых бытовых и промышленных отходов, 18 подземных резервуаров на Харасавэйском месторождении, 12 шламовых амбаров на Пякяхинском месторождении, 3 полигона буровых отходов, 2 площадки для хранения бурового шлама на Южно-Тамбейском месторождении. Авторы [10] утверждают, что для месторождений, находящихся в районах ММП, наиболее экономически эффективным и технологически реализуемым

вариантом утилизации отходов бурения является их закачка в подземные резервуары. Стоит, однако, отметить, что регион постепенно развивается и требует значительного количества строительных материалов для создания инфраструктурных объектов при освоении Тамбейской группы, Верхнетейского и Западно-Сеяхинского месторождений «Обского СПГ», объектов последующих очередей проекта «Ямал СПГ», а также поддержания имеющейся инфраструктуры, подверженной постоянному влиянию со стороны изменчивого климата. Чтобы избежать нехватки строительных ресурсов во время увеличения на них спроса, необходимо комплексно подойти к решению вопросов переработки отходов бурения на рассматриваемой территории.

Отходы бурения нефтяных и газовых скважин — возможное сырье для производства различного рода продуктов [34]. Из твердой фракции отходов можно получать заполнители для бетонов, цемент, грунтовые смеси и щебень для строительства дорог и кустовых площадок, кирпич и тротуарные плитки, а также пропант для гидроразрыва пласта при добыче углеводородов [35—37]. Недавние исследования указывают на возможность извлечения редкоземельных элементов из отходов различного литологического состава [38; 39], что открывает новые возможности для устойчивого использования ресурсов и валоризации отходов в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности [40].

Регулирование деятельности компаний по утилизации отходов бурения отражается в федеральном законе «Об отходах производства и потребления»

¹ Реестр объектов размещения отходов, включенных в ГРОПО по Ямало-Ненецкому автономному округу. — URL: https://rpn.gov.ru/regions/72/for_users/vedenie-groro/.

от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ², постановлении Правительства РФ «Об утверждении Правил исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду» № 881³. За размещение отходов компании обязаны вносить плату за негативное воздействие на окружающую среду (НВОС), исчисляемую на каждую тонну размещенных отходов. Ставки по платам регламентируются согласно постановлению Правительства РФ «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» от 13 сентября 2016 г. № 913⁴.

Согласно Банку данных об отходах⁵, отходы бурения нефтяных и газовых скважин относятся к трем классам опасности: III, IV и V. Каждому из них соответствует определенная ставка платы за НВОС.

На Бованенковском и Харасавэйском месторождениях продолжается бурение эксплуатационного фонда скважин, на последнем также ведутся поисковые работы, и за 2024 г. произошел прирост запасов газа на 100 млрд м³⁶. В среднем за год на месторождениях бурят по 40–50 скважин протяженностью от 700 до 4000 м⁷. Объем отходов бурения определяется согласно руководящему документу РД 39-3-819-91⁸. Буровые отходы состоят из твердой фазы (бурового шлама и отходов цементирования) и жидкой фазы (отработанного бурового раствора и буровых сточных вод). На скважинах месторождений полуострова Ямал на одну скважину приходится от 550 до 1660 м³ отходов (среднее значение — 960 м³). Твердая фаза составляет 30%, жидкая — 70% объема. Средняя плотность твердой фазы отходов составляет от 2,5 до 2,7 т/м³ [41].

Следовательно, масса отходов твердой фазы (из которой возможно производство строительных материалов) с одной скважины в среднем составляет 748,8 т — существенный ресурс для вторичного использования. Из жидкой фракции также возможно получать некоторые виды топлива (дизельного, мазутного) [42; 43].

Обращение с отходами бурения на месторождениях полуострова Ямал можно представить в виде схемы (рис. 2).

Переработка отходов бурения в рассматриваемом регионе может привести к нескольким положительным эффектам: сокращению объемов размещения отходов (как следствие, снижению платы за НВОС) и экономии денежных средств на транспортировку строительных материалов (в частности, щебня). Тогда экономическую эффективность переработки шлама в строительный материал можно представить в виде

$$\mathcal{E} = \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Тр}_{i,j} + \text{УТ}_{i,j} + \text{НВОС}_{i,j} - \text{Пер}_{i,j} - \text{ТрМ}_{i,j})}{(1 + 0,01r)^j},$$

где \mathcal{E} — экономическая эффективность, млн руб.; $i = 1, 2, \dots, n$; n — количество месторождений (точек генерации отходов); $j = 0, 1, \dots, m$; m — продолжительность бурения месторождений, лет; Тр — затраты на транспорт щебня, млн руб.; УТ — затраты на утилизацию отходов бурения (в зависимости от способа утилизации), млн руб.; НВОС — плата за размещение отходов, млн руб.; Пер — затраты на переработку шлама в строительный материал, млн руб.; ТрМ — затраты на транспорт строительного материала, млн руб.; r — ставка дисконтирования (25%).

Транспорт строительного материала (щебня) в рассматриваемом регионе осуществляется по зимникам (ограниченное время в течение года), с помощью водного транспорта (к объектам, находящимся на побережье) и по железнодорожным путям (круглый год). В целом описать затраты на транспорт можно формулой

$$\text{Тр}_{i,j} = Q_{i,j} (\text{Ц}_m + \text{TS}) 10^{-3},$$

где Q — объем (масса) строительных материалов, равный объему (массе) твердой фазы отходов бурения, тыс. т; Ц_m — цена строительного материала (щебня), руб./т; T — тариф на перевозку, руб./(т·км); S — расстояние, определяемое по открытым данным с помощью надстройки QNEAT3 в программе QGIS Desktop 3.34.0, км; 10^{-3} — переводной коэффициент в млн руб.

Расстояние S показано на рис. 3. Производство щебня в регионе ведется на трех месторождениях нерудных полезных ископаемых: Матпугольском, Нягарпугольском и Подгорненском⁹.

² Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/.

³ Постановление Правительства РФ «Об утверждении Правил исчисления и взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации и отдельного положения акта Правительства Российской Федерации» от 31 мая. 2023 г. № 881. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_448455/.

⁴ Постановление Правительства РФ «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» от 13 сентября 2016 г. № 913 (ред. от 24 января 2020 г.). — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_204671/.

⁵ Банк данных об отходах. — URL: <https://rpn.gov.ru/activity/regulation/kadastr/bdo/>.

⁶ Газпром прирастит 100 млрд куб. м запасов газа на Харасавэе по итогам доразведки в 2024 г. — URL: <https://lenta.profinansy.ru/news/3815571>.

⁷ Русгазбурение. Текущие проекты. — URL: <https://rusgazburenje.ru/projects/current/>.

⁸ РД 39-3-819-91. Методические указания по определению объемов отработанных бурительных растворов и шламов при строительстве скважин. — URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4293828/4293828789.htm>.

⁹ На Ямале производят свой материал для ремонта дорог. — URL: <https://dtidh.yanao.ru/presscenter/news/160529/>.

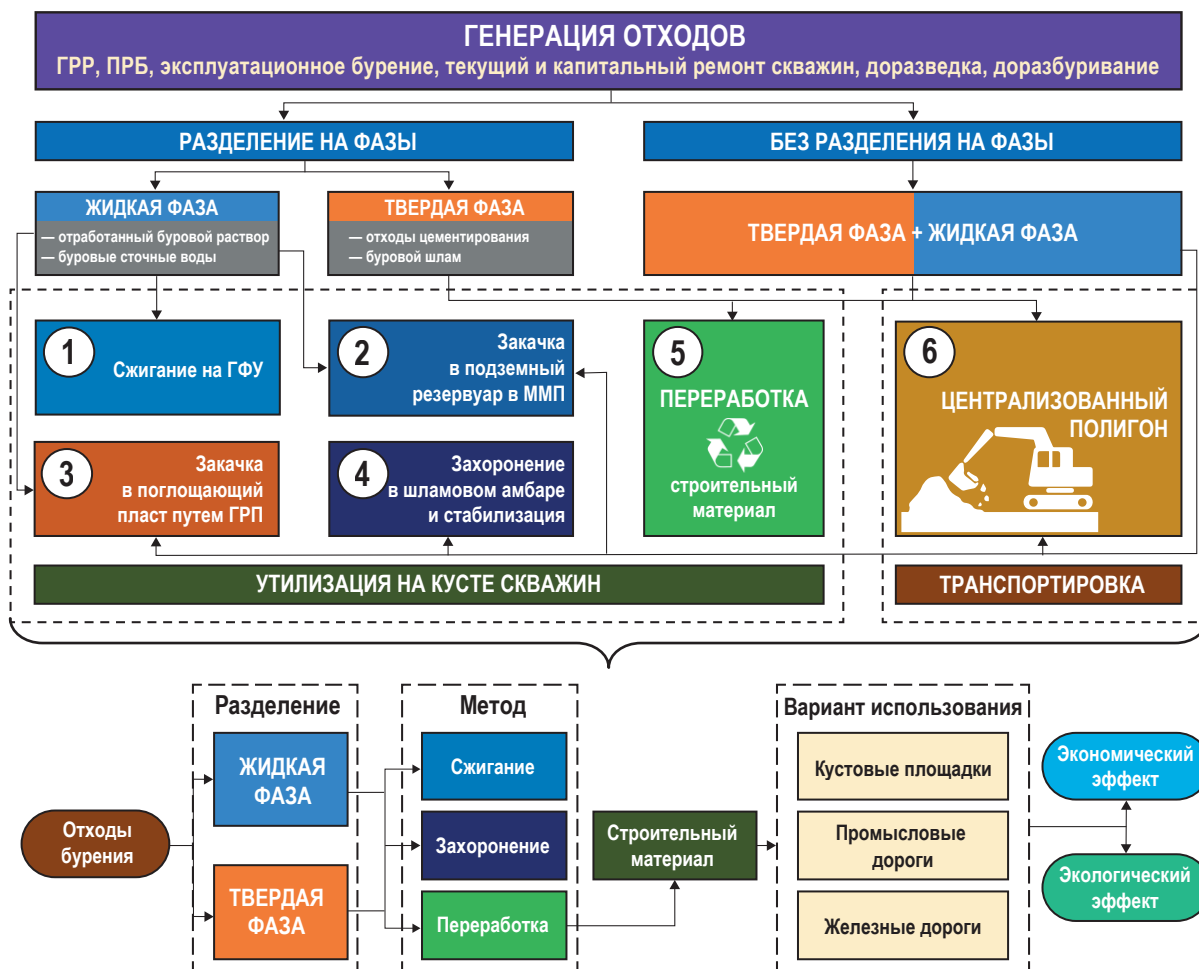


Рис. 2. Схема управления отходами бурения на месторождениях полуострова Ямал. Составлено авторами по данным [10]
 Fig. 2. Drilling waste management on the Yamal Peninsula. Compiled by the authors based on [10]

Транспортировка щебня по железнодорожному пути короче, чем по зимникам, в среднем на 31 км. Тарифы в регионе на железнодорожные перевозки ниже, чем на автоперевозки (движение по зимникам разрешено только в организованных колоннах), к тому же железнодорожный способ доставки является круглогодичным.

Затраты на утилизацию зависят от способа обращения. Удельные затраты на утилизацию, в том числе на переработку, представлены в [10].

Плата за негативное воздействие на окружающую среду исчисляется согласно постановлению Правительства РФ «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» от 13 сентября 2016 г. № 913. В общем виде она определяется по формуле

$$НВОС_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{— без размещения отходов} \\ W_{i,j} \cdot C_{тНВОС} \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot 10^{-3} & \text{— при размещении отходов} \end{cases},$$

где W — количество буровых отходов, тыс. т; $C_{тНВОС}$ — ставка за размещение отходов, руб./т; c_1 ,

c_2, c_3 — дополнительные коэффициенты ($c_1 = 1,32$; $c_2 = 0,49$; $c_3 = 2$).

Чтобы продолжить развитие Северного широтного хода, необходимо связать железнодорожную станцию «Бованенково» с портом Сабетта. Для этого потребуется железная дорога длиной приблизительно 173 км по прямой. Следовательно, нужно начать переработку отходов на Бованенковском НГКМ и организовать на его территории централизованный пункт приема и переработки отходов бурения. Однако с месторождений Крузенштернского (планируемый запуск в 2028 г.¹⁰) и Харасавэйского (разрабатываемого) до Бованенковского можно добраться только по зимникам¹¹ (рис. 4).

¹⁰ Крузенштернское ГКМ. — URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/551549-kruzenshternskoe-gkm/>.

¹¹ Поселок Харасавэй: два триллиона долларов под ногами, медведи на улице и северное сияние над головой. — URL: <https://yamal-media.ru/narrative/poselok-harasavej-dva-trilliona-dollarov-pod-nogami-medvedi-na-ulitse-i-severnoe-sijanie-nad-golovoj>.



Рис. 3. Расстояние по зимникам и железнодорожным путям от карьеров до Бованенковского месторождения. Составлено авторами с помощью программы QGIS Desktop 3.34.0

Fig. 3. Distance along winter roads and railway from open pits to the Bovanenkovskoye field. Compiled by the authors using the QGIS Desktop 3.34.0

Согласно предполагаемому сценарию, в течение трех лет происходит эксплуатационное бурение на Бованенковском и Харасавэйском месторождениях. Твердая фаза отходов бурения перерабатывается на централизованном полигоне на территории Бованенковского месторождения, жидкая фаза отходов закачивается в поглощающие горизонты либо в подземные резервуары ММП. Строительный материал, получаемый в процессе переработки, идет на прокладку участка железной дороги от станции Бованенково до порта Сабетта.

Ввод скважин по месторождениям осуществляется следующим образом:

- Бованенковское: по 43 скважины в течение 3 лет с 2025 по 2027 гг.¹²;
- Харасавэйское: по 56 скважин в течение 3 лет с 2025 по 2027 гг.¹³;

- Крузенштернское: по 42 скважины в течение 4 лет с 2028 по 2031 гг.¹⁴;
- Верхнетиутейское: по 35 скважин в течение 4 лет с 2029 по 2032 гг.¹⁵;
- Западно-Сеяхинское: по 45 скважин в течение 3 лет с 2030 по 2032 гг.¹⁶.

Таким образом, с 2025 по 2032 гг. будет постоянная генерация отходов бурения в рассматриваемом регионе.

Объем строительного материала можно найти по следующей формуле, считая, что для переработки шлама в строительный материал требуется смесь шлама и песка 0,5:1:

$$M_{i,j} = W_{i,j} (1 + \theta),$$

¹² На Бованенково готовят к запуску 43 новые скважины. — URL: <https://nprom.online/news/na-bovanyenkov-gotovyat-k-zapusku-43-novih-skvazheeni/>.

¹³ Русгазбурение. Харасавэйское ГКМ. — URL: <https://rusgazburenje.ru/projects/current/ipm/harasavey/>.

¹⁴ Крузенштернское ГКМ. — URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/551549-kruzenshternskoe-gkm/>.

¹⁵ Обустройство Западно-Сеяхинского месторождения. Кусты скважин № 21, 22, 23, 11, 12, система газосбора. — URL: <https://ovos.ecom.su/handle/123456789/503?show=full>.

¹⁶ Там же.

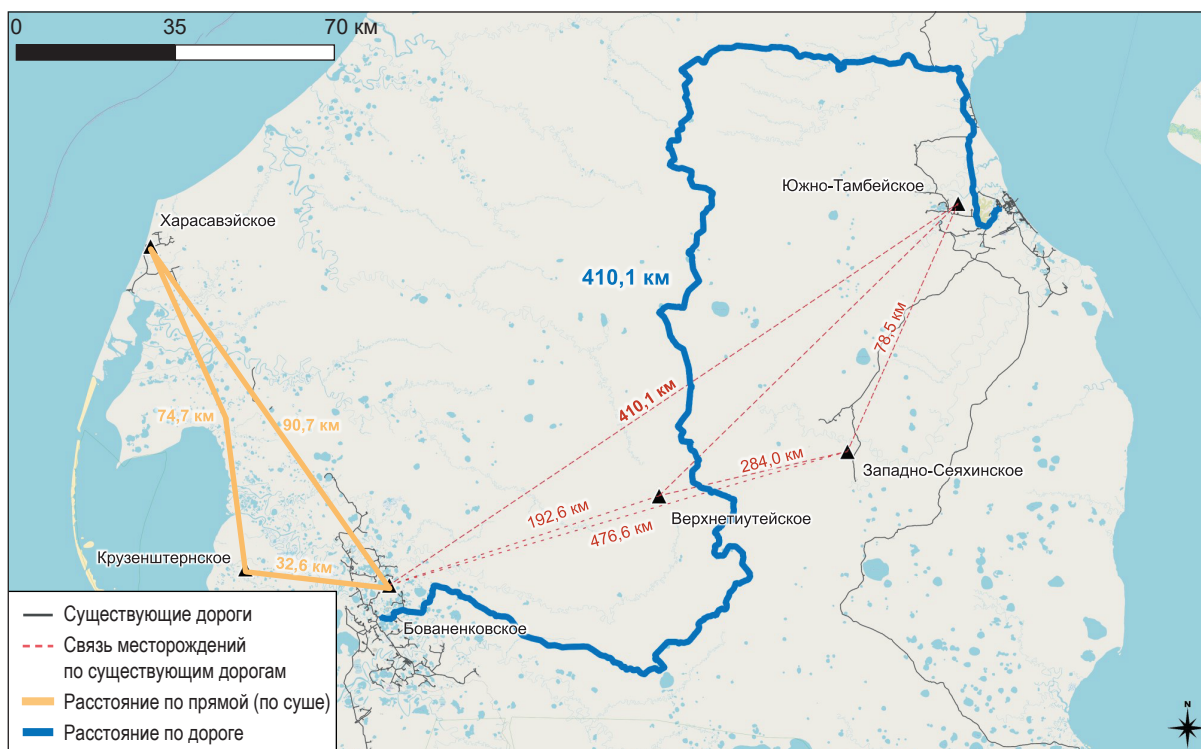


Рис. 4. Транспортная связность месторождений. Составлено авторами с помощью программы QGIS Desktop 3.34.0
 Fig. 4. Transport connectivity of deposits. Compiled by the authors using the QGIS Desktop 3.34.0

где θ — отношение объема (массы) песка к объему (массе) шлама (если $\theta = 1$, то 1:1, если $\theta = 2$, то 2:1 и т. д.).

В отличие от щебня в регионе имеется достаточное количество месторождений песка¹⁷. Разработка их ведется гидронамывным и сухоройным способом¹⁸.

Протяженность грунтовой полосы для строительства одноколейного железнодорожного пути можно найти по формуле

$$X_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{K_{\text{упл}} B H \rho_{\text{щ}}},$$

где X — протяженность грунтовой полосы, км; $K_{\text{упл}}$ — коэффициент уплотнения (1,3—1,5); B — ширина грунтовой полосы, м (5,5—7,5); H — высота насыпи, м (0,3—0,5); $\rho_{\text{щ}}$ — плотность щебня, т/м³ (1,4—1,65).

Отходы с Южно-Тамбейского месторождения (принадлежащего компании ПАО «НОВАТЭК») транспортировать до Бованенковского месторождения необходимо на расстояние свыше 400 км. Однако это может быть нецелесообразно из-за высоких

затрат на транспортировку: при стоимости доставки 90 руб./(т·км) себестоимость доставки 1 т составит 36 000 руб., что выше стоимости самой переработки.

Результаты

Расчет эффективности начинается с нахождения объема отходов по годам, объема строительного материала, который можно получить путем переработки шлама, и максимально возможной протяженности прокладываемого грунтового полотна для строительства железнодорожного пути. В табл. 2 представлены основные рассчитываемые параметры. Суммарно с пяти выбранных месторождений образуется 585,6 тыс. т твердых отходов бурения, из которых возможно получение строительного материала массой 878,3 тыс. т. С таким количеством материала возможно отсыпать грунтовую полосу длиной 155,7 км.

В соответствии с полученными данными экономическая эффективность составит 2 454,6 млн руб. Однако оценка экономической эффективности проекта, характеризующегося высоким уровнем неопределенности исходных данных, лишь на основе статических параметров является недостаточной [44; 45]. В таких условиях целесообразно использовать стохастические методы анализа, одним из которых является метод Монте-Карло [41; 46—48]. Он позволяет учесть неопределенность исходных данных за счет многократного моделирования возможных сценариев с использованием случайных

¹⁷ Перечень участков недр местного значения по Ямало-Ненецкому автономному округу (с дополнениями № 1—54). — URL: <https://dprg.yanao.ru/documents/active/114860/>.

¹⁸ «Газпром добыча Тамбей» заплатит 14 миллиардов за добычу песка в ЯНАО. — URL: <https://pravdaurfo.ru/novost/420584-gazprom-dobycha-tambej-zaplatit-14-milliardov-za-dobychu-peska-v-yanao/>.

Таблица 2. Генерация отходов, объемы строительного материала и получаемая протяженность грунтовой полосы

Table 2. Waste generation, volumes of building material, and the resulting length of the dirt strip

Параметр	Всего	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Твердая фаза отходов бурения, тыс. т:	585,6	74,1	74,1	74,1	31,4	57,7	91,4	91,4	91,4
Бованенковское	96,6	32,2	32,2	32,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Харасавэйское	125,8	41,9	41,9	41,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Крузенштернское	157,2	0,0	0,0	0,0	31,4	31,4	31,4	31,4	31,4
Верхнетиутейское	104,8	0,0	0,0	0,0	0,0	26,2	26,2	26,2	26,2
Западно-Сеяхинское	101,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,7	33,7	33,7
Масса строительного материала, тыс. т:	878,3	111,2	111,2	111,2	47,2	86,5	137,0	137,0	137,0
Бованенковское	144,9	48,3	48,3	48,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Харасавэйское	188,7	62,9	62,9	62,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Крузенштернское	235,9	0,0	0,0	0,0	47,2	47,2	47,2	47,2	47,2
Верхнетиутейское	157,2	0,0	0,0	0,0	0,0	39,3	39,3	39,3	39,3
Западно-Сеяхинское	151,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,5	50,5	50,5
Протяженность дорог, км:	155,7	19,7	19,7	19,7	8,4	15,3	24,3	24,3	24,3
Бованенковское	84,8	8,6	8,6	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Харасавэйское	364,6	11,1	11,1	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Крузенштернское	635,0	0,0	0,0	0,0	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4
Верхнетиутейское	194,8	0,0	0,0	0,0	0,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Западно-Сеяхинское	173,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,0	9,0	9,0

величин, отражающих вероятностное распределение параметров. Исходные параметры для моделирования методом Монте-Карло представлены в табл. 3.

Динамическое значение задано с помощью функции MS Excel «СЛУЧМЕЖДУ». Расчет производился для 1 000 000 итераций с помощью макросов VBA. Результаты моделирования приведены на рис. 5.

Результаты моделирования методом Монте-Карло демонстрируют следующие показатели: среднее значение моделируемой величины составило 2 476,8 млн руб., стандартное отклонение — 3 207,7 млн руб., коэффициент вариации — 1,30. Минимальное и максимальное значения равны соответственно –7 699,1 и 13 520,4 млн руб.

Следует отметить, что вероятность отрицательного экономического эффекта, т. е. что $\Delta < 0$, по результатам моделирования составила 25,42%. Это указывает на наличие значительной доли сценариев с отрицательным результатом, что важно учитывать при принятии управленческих решений.

Коэффициент вариации, равный 1,30, характеризует высокую степень относительной изменчивости

экономической эффективности: стандартное отклонение превышает среднее значение более чем на 30%. Это свидетельствует о существенной нестабильности моделируемого проекта и высокой неопределенности результатов. Таким образом, при принятии управленческого решения на основе полученных данных необходимо учитывать высокий уровень риска, обусловленный значительным разбросом возможных исходов.

Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют значительный потенциал переработки буровых отходов в строительные материалы для развития транспортной инфраструктуры арктических проектов СПГ. Однако анализ выявил ряд ключевых аспектов, требующих детального обсуждения.

Во-первых, рассчитанная средняя величина экономического эффекта (2 476,8 млн руб.) подтверждает принципиальную экономическую целесообразность предлагаемого подхода. Основными драйверами экономии являются избежание затрат на транспортировку щебня из отдаленных регионов

Таблица 3. Исходные параметры моделирования экономической эффективности методом Монте-Карло

Table 3. Initial parameters for Monte Carlo simulation of economic efficiency

Параметр	Единица измерения	Статическое значение	Динамическое значение	От	До
Процент твердой фазы	%	30	37,49	20,00	40,00
Плотность отходов	т/м ³	2,60	2,51	2,50	2,80
Цена доставки щебня:	руб./((т·км)				
железнодорожным транспортом		30,0	15,2	10,0	50,0
автотранспортом		120,0	111,7	80,0	160,0
Цена щебня	руб./т	4 500,0	4 416,2	4 300,0	4 700,0
Доля отходов III категории	%	15,0	15,6	5,0	25,0
$K_{упл}$		1,40	1,35	1,30	1,50
Ширина грунтовой полосы	м	6,50	6,11	5,50	7,50
Высота грунтовой полосы	м	0,40	0,32	0,30	0,50
Плотность щебня	т/м ³	1,55	1,41	1,40	1,65
Стоимость переработки в строительный материал	руб./т	25 027,6	24 537,6	20 027,6	30 027,6
Стоимость утилизации	руб./т	8 831,6	8 407,2	7 831,6	9 831,6

и сокращение платежей за негативное воздействие на окружающую среду.

Во-вторых, ключевым результатом исследования является выявление высокой степени неопределенности и риска, связанного с проектом. Высокий коэффициент вариации (1,30) и значительная вероятность отрицательного экономического эффекта

(25,42%) указывают на то, что положительный результат не является гарантированным при всех сценариях. Наибольшее влияние на результат оказывают такие переменные, как стоимость переработки, тарифы на транспортировку и процентное содержание твердой фазы в отходах. Это свидетельствует о том, что традиционная оценка эффективности на

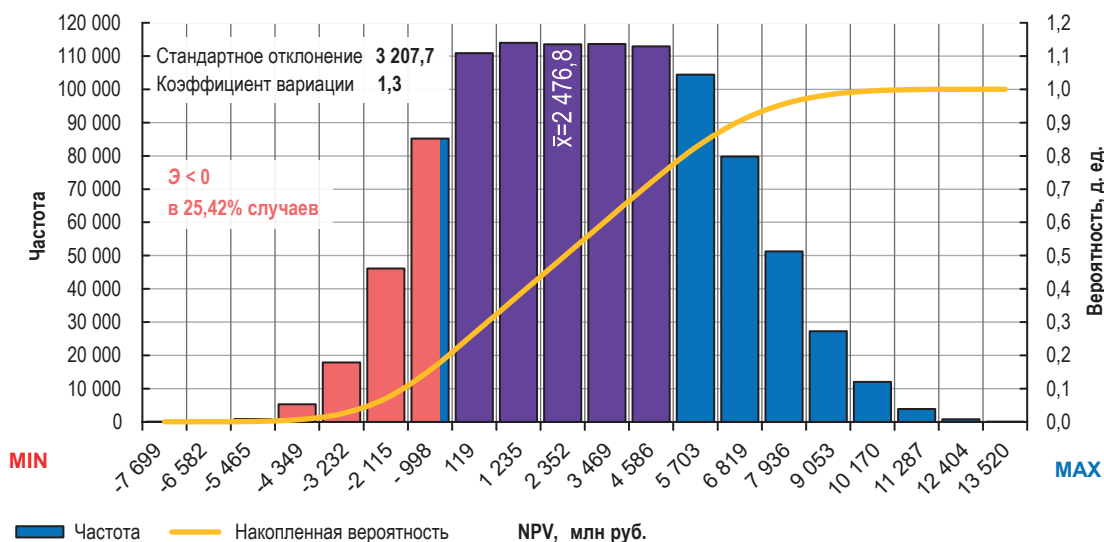


Рис. 5. Распределение значений экономической эффективности. Составлено авторами
Fig. 5. Distribution of economic efficiency values. Compiled by the authors

основе детерминированных параметров недостаточна для принятия управленческих решений в условиях Арктики и должна быть дополнена вероятностными методами.

В-третьих, успешная реализация проекта критически зависит от решения логистических задач по сбору и транспортировке отходов с удаленных месторождений (таких, как Крузенштернское и Харасавэйское) на централизованный пункт переработки. Как показали расчеты, транспортировка отходов на большие расстояния (свыше 400 км) может нивелировать весь экономический эффект. Следовательно, наиболее жизнеспособной представляется децентрализованная модель с созданием мобильных или стационарных перерабатывающих модулей на кластерах близлежащих месторождений.

Важно отметить, что актуальность данного исследования значительно возрастает в свете вступления в силу с 1 января 2025 г. распоряжения Правительства РФ № 2330-р¹⁹, которое обязывает недропользователей использовать вскрышные породы и отходы производства при горных и инфраструктурных работах. Это создает дополнительные регуляторные стимулы и снижает риски, связанные с изменением нормативной базы, делая инвестиции в перерабатывающие мощности более предсказуемыми.

Заключение

Результаты исследования подтверждают, что повторное использование отходов бурения позволяет не только сократить экологическую нагрузку на регион, но и повысить экономическую эффективность проектов за счет снижения зависимости от ввозимых из соседних регионов строительных материалов. Такой подход обеспечивает реализацию промышленных проектов в Арктике за счет создания необходимой инфраструктуры с учетом экологических требований.

Основные выводы:

1. В исследовании обоснована возможность интеграции принципов экономики замкнутого цикла в проекты освоения Арктики, в частности — переработки отходов бурения в строительный материал для создания транспортной инфраструктуры, необходимой для улучшения связности региона.

2. Проведенные расчеты и моделирование методом Монте-Карло позволили определить ключевые параметры экономической эффективности переработки отходов: среднее значение экономического эффекта — 2 476,8 млн руб., стандартное отклонение — 3 207,7 млн руб., коэффициент вариации — 1,30, вероятность отрицательного эффекта — 25,42%.

3. Результаты демонстрируют значительный потенциал переработки отходов бурения как с точки зрения сокращения экологической нагрузки, так и с позиций экономической выгоды за счет снижения расходов на транспортировку и плату за негативное воздействие на окружающую среду. Выявленный высокий уровень риска, связанный с неопределенностью исходных данных, указывает на необходимость более углубленного технико-экономического обоснования и риск-менеджмента при реализации подобных проектов.

4. Особенно важным аспектом является вступление в силу с 1 января 2025 г. распоряжения Правительства РФ № 2330-р, которое обязывает горнодобывающие компании использовать вскрышные породы и шлаки при горных и инфраструктурных работах. Это, несомненно, усиливает актуальность внедрения переработки вторичных ресурсов и требует от недропользователей адаптации производственных и логистических процессов.

5. Внедрение разработанных решений способно повысить устойчивость крупных промышленных проектов в Арктике, в частности на полуостровах Ямал и Гыдан, способствуя формированию надежной транспортной инфраструктуры и реализации национальных стратегических задач в условиях сурового северного климата.

Представленное исследование открывает несколько перспективных направлений для дальнейшего изучения и практического применения в сфере развития арктической инфраструктуры и интеграции циркулярной экономики: (1) изучение потенциала использования других типов отходов совместно с отходами бурения; (2) анализ соответствия стратегий новым государственным требованиям; (3) разработка комплексных мер снижения рисков, включающих страхование, госсубсидии или государственно-частное партнерство.

Литература/References

1. Cherepovitsyn A., Rutenko E., Solovyova V. Sustainable development of oil and gas resources: A system of environmental, socio-economic, and innovation indicators. *J. of Marine Science and Engineering*, 2021, vol. 9, no. 11. DOI: 10.3390/jmse9111307.
2. Dmitrieva D., Solovyova V. Russian Arctic Mineral Resources Sustainable Development in the Context of Energy Transition, ESG Agenda and Geopolitical Tensions. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 13, p. 5145. DOI: 10.3390/en16135145.
3. Цветков П. С., Федосеев С. В. Анализ специфики организации проектов малотоннажного производства СПГ // *Зап. Гор. ин-та.* — 2021. — Т. 246. — С. 678—686. — DOI: 10.31897/PMI.2020.6.10. Tsvetkov P., Fedoseev S. Analysis of project organization specifics in small-scale LNG production. *J. of Mining Institute*, 2021, vol. 246, pp. 678—686. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.10.

¹⁹ Распоряжение Правительства РФ от 28 августа 2024 г. № 2330-р. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202409020031?index=1>.

4. Litvinenko V. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas Resources, 2020, vol. 9, no. 5, p. 59. DOI: 10.3390/resources9050059.
5. Tsvetkov P. Small-scale LNG projects: Theoretical framework for interaction between stakeholders. Energy Reports, 2022, vol. 8, pp. 928—933. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.195.
6. Пономарев М. В. Эколого-правовые проблемы обращения с отходами недропользования в Арктической зоне Российской Федерации // Журн. рос. права. — 2022. — Т. 25, № 10. — С. 143—156. — DOI: 10.12737/jrl.2021.129.
- Ponomarev M. Environmental and Legal Problems of Subsurface Use Waste Management in the Arctic Zone of the Russian Federation. J. of Russian Law, 2022, vol. 25, no. 10, pp. 143—156. DOI: 10.12737/jrl.2021.129. (In Russian).
7. Череповицын А. Е., Лебедев А. П. Экономическая и экологическая эффективность переработки бурового шлама при бурении нефтяных и газовых скважин // Отходы и ресурсы. — 2023. — Т. 10, № 4. — DOI: 10.15862/10ECOR423.
- Cherepovitsyn A. E., Lebedev A. P. Economic and environmental efficiency of drill cuttings processing in oil and gas drilling operations. Russian journal of resources, conservation and recycling, 2023, vol. 10, no. 4. DOI: 10.15862/10ECOR423. (In Russian).
8. Пичугин Е. А., Шенфельд Б. Е., Сомова Т. Н. Оценка воздействия объектов накопленного вреда в Арктике на компоненты природной среды // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2 (54). — С. 249—260. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-249-260.
- Pichugin E. A., Shenfeld B. E., Somova T. N. Assessment of the impact of accumulated harm objects in the Arctic on the natural environment components. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 249—260. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-249-260. (In Russian).
9. Румянцева А. В., Березюк М. В., Пластинина Ю. В. Обоснование метода утилизации буровых отходов при добыче нефти на основе современных технологий // Вестн. евраз. науки. — 2023. — Т. 15, № 2.
- Rumyantseva A. V., Berezyuk M. V., Plastinina Yu. V. The method rationale of drilling waste disposal in oil production based on modern technologies. The Eurasian Scientific J., 2023, vol. 15, no. 2. (In Russian).
10. Сурин С. Д., Савич О. И., Филимонов Ю. Л. Захоронение отходов бурения в подземных резервуарах в многолетнемерзлых породах // Науч. журн. Рос. газ. о-ва. — 2020. — № 2 (25). — С. 36—47.
- Surin S. D., Savich O. I., Filimonov Yu. L. Drilling Waste Disposal in Underground Reservoirs in Permafrost Grounds. Scientific J. of Russian Gas Society, 2020, no. 2 (25), pp. 36—47. (In Russian).
11. Булатов В. И., Игенбаева Н. О., Нанишвили О. А. Отходы нефтегазового комплекса как технологический индикатор геоэкологического состояния регионов России // Бюл. науки и практики. — 2021. — Т. 7, № 8. — С. 46—55. — DOI: 10.33619/2414-2948/69/05.
- Bulatov V., Igenbaeva N., Nanishvili O. Oil and Gas Complex Waste Products as Technological Indicator of Geoecological Condition of Russia Regions. Bull. of Science and Practice, 2021, vol. 7, no. 8, pp. 46—55. DOI: 10.33619/2414-2948/69/05. (In Russian).
12. Ghosh S. K., Smirnova T. S., Maryev V. A., Dineshkumar M. Remediation Process in Landfill in Arctic Region — A Case of Circular Economy. The J. of Solid Waste Technology and Management, 2023, vol. 49, no. 1, pp. 14—31. DOI: 10.5276/jswtm/iswmaw/491/2023.14.
13. Galevskiy S., Ponomarenko T., Tsiglianu P. The Impact of Self-Sufficiency in Basic Raw Materials of Metallurgical Companies on Required Return and Capitalization: The Case of Russia. J. of Risk and Financial Management, 2025, vol. 18, no. 6, p. 318. DOI: 10.3390/jrfm18060318.
14. Цветков П. С. Кластерный подход к улавливанию и транспортировке промышленного CO₂: экономия за счет совместной инфраструктуры // Зап. Гор. ин-та. — 2025.
- Tsvetkov P. S. Cluster Approach for Industrial CO₂ Capture and Transport: Savings via Shared Infrastructure. J. of Mining Institute, 2025.
15. Massel L., Komendantova N., Massel A. et al. Resilience of socio-ecological and energy systems: Intelligent information technologies for risk assessment of natural and technogenic threats. J. of Infrastructure, Policy and Development, 2024, vol. 8, no. 7, p. 4700. DOI: 10.24294/jipd.v8i7.4700.
16. Kazamias G., Zorpas A. A. Drill cuttings waste management from oil and gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy. J. of Cleaner Production, 2021, vol. 322, p. 129098. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129098.
17. Smol M., Adam C., Preisner M. Circular economy model framework in the European water and wastewater sector. J. of Material Cycles and Waste Management, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 682—697. DOI: 10.1007/s10163-019-00960-z.
18. Marinina O., Kirsanova N., Nevskaya M. Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework. Energies, 2022, vol. 15, no. 24, p. 9376. DOI: 10.3390/en15249376.
19. Власов А. С., Пугин К. Г., Сурков А. А. Геоэкологическая оценка технологии использования отходов бурения в составе асфальтобетона // Нефтяное khozyaystvo — Oil Industry. — 2020. — № 12. — С. 139—142. — DOI: 10.24887/0028-2448-2020-12-139-142.
- Vlasov A. S., Pugin K. G., Surkov A. A. Geoecological assessment of the technology for using drilling waste in the composition of asphalt-concrete. Neftyanoe khozyaystvo — Oil Industry, 2020, vol. 2020, no. 12, pp. 139—142. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-12-139-142. (In Russian).

20. Орешкин Д. В., Шадрунова И. В., Чекушина Т. В., Прошляков А. Н. Утилизация отходов мрамора и бурового шлама в процессе производства строительных материалов // Строит. материалы. — 2019. — Т. 769, № 4. — С. 65—72. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37621304>.
- Oreshkin D. V., Shadrunova I. V., Chekushina T. V., Proshlyakov A. N. Utilization of wastes of marble and drill cuttings in the process of building materials production. *Stroitel'nye Materialy*, 2019, vol. 769, no. 4, pp. 65—72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-769-4-65-72. (In Russian).
21. Syas'ko V., Shikhov A. Assessing the State of Structural Foundations in Permafrost Regions by Means of Acoustic Testing. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 5, p. 2364. DOI: 10.3390/app12052364.
22. Lebedev A., Cherepovitsyn A. Waste Management during the Production Drilling Stage in the Oil and Gas Sector: A Feasibility Study. *Resources*, 2024, vol. 13, no. 2, p. 26. Available at: <https://www.mdpi.com/2079-9276/13/2/26>.
23. Nevskaya M. A., Belyaev V. V., Pasternak S. N. et al. Accidental oil spills in the Arctic: An assessment of potential soil damage. *Sever i Rynok: Formirovanie Ekonomicheskogo Poryadka*, 2024, vol. 27, no. 3, pp. 107—122. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2024.85.007.
24. Ilinykh G., Fellner J., Sliusar N., Korotaev V. A life cycle assessment of drilling waste management: a case study of oil and gas condensate field in the north of western Siberia, Russia. *Sustainable Environment Research*, 2023, vol. 33, no. 1, p. 9. DOI: 10.1186/s42834-023-00171-0.
25. Крапивский Е. И. Нефтешламы: уничтожение, утилизация, дезактивация. — Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. — 432 с.
- Krapivsky E. I. Oil sludge: destruction, disposal, decontamination. Moscow; Vologda, Infra-Inzheneriya, 2021, 432 p. (In Russian).
26. Разманова С. В., Андрухова О. В. Нефтесервисные компании в рамках цифровизации экономики: оценка перспектив инновационного развития // Зап. Гор. ин-та. — 2020. — Т. 244. — С. 482—492. — DOI: 10.31897/pmi.2020.4.11.
- Razmanova S., Andrukhova O. Oilfield service companies as part of economy digitalization: assessment of the prospects for innovative development. *J. of Mining Institute*, 2020, vol. 244, pp. 482—492. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.11.
27. Щерба В. А., Мазяев А. В., Удаляя Д. В. и др. Геоэкологические проблемы утилизации отходов нефтегазовой отрасли на Крайнем Севере России // Проблемы регион. экологии. — 2020. — № 4. — С. 100—106. — DOI: 10.24411/1728-323X-2020-14100.
- Shcherba V. A., Mazaev A. V., Udalya D. V. et al. Geoecological Issues of Oil and Gas Industry Waste Disposal in The Far North of Russia. *Regional Environmental Issues*, 2020, no. 4, pp. 100—106. DOI: 10.24411/1728-323X-2020-14100. (In Russian).
28. Вакуленко И. С., Smirnov V. I., Surin S. D. Опыт строительства и перспективы использования подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах для захоронения отходов бурения // Гор. информ.-аналит. бюл. — 2016. — № 1. — С. 222—229.
- Vakulenko I. S., Smirnov V. I., Surin S. D. Experience of Construction and Prospects for The Use of Underground Storages for Drilling Waste in Permafrost. *Mining Informational and Analytical Bull.*, 2016, no. 1, pp. 222—229. (In Russian).
29. Дрозд А. Н., Тимонов Е. Г., Каверин А. А., Корниенко Д. А. Эффективное применение подземных резервуаров в многолетнемерзлых грунтах для размещения отходов бурения // Деловой журн. Neftegaz. RU. — 2024. — № 9 (153). — С. 84—87.
- Droz A. N., Timonov E. G., Kaverin A. A., Kornienko D. A. Effective Use of Underground Reservoirs in Permafrost Soils for The Disposal of Drilling Waste. *Business magazine "Neftegaz.RU"*, 2024, no. 9 (153), pp. 84—87. (In Russian).
30. Опекунов А., Опекунова М., Кукешкин С., Лисенков С. Impact of drilling waste pollution on land cover in a high subarctic forest-tundra zone. *Pedosphere*, 2022, vol. 32, no. 3, pp. 414—425. DOI: 10.1016/S1002-0160(21)60083-8.
31. Khodadadi M., Moradi L., Dabir B. et al. Reuse of drill cuttings in hot mix asphalt mixture: A study on the environmental and structure performance. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 256, p. 119453. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119453.
32. Орешкин Д. В., Сахаров Г. П., Чеботаев А. Н., Курбатова А. С. Геоэкологические проблемы утилизации бурового шлама на Ямале // Вестн. МГСУ. — 2012. — № 2. — С. 125—129.
- Oreshkin D. V., Saharov G. P., Chebotaev A. N., Kurbatova A. S. Geo-Ecological Problems of Drilling Waste Disposal in the Yamal Peninsula. *Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 2012, no. 2, pp. 125—129. (In Russian).
33. Чеботаев А. Н. Возможность утилизации бурового шлама Бованенковского месторождения в производстве строительных материалов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. — 2015. — № 9. — С. 26—29.
- Chebotaev A. N. Possibility of Drilling Sludge Recovery of Bovanenkovo Field While Producing Construction Materials. *Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*, 2015, no. 9, pp. 26—29. (In Russian).
34. Morero B., Paladino G. L., Montagna A. F., Cafaro D. C. Integrated Waste Management: Adding Value to Oil and Gas Industry Residues Through Co-processing. *Waste and Biomass Valorization*, 2023, vol. 14, no. 4, pp. 1391—1412. DOI: 10.1007/s12649-022-01908-5.
35. Pereira L. B., Sad C. M. S., Castro E. V. R. et al. Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. *Fuel*, 2022, vol. 310, p. 122301. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122301.

36. Третьяк А. А., Яценко Е. А., Доронин С. В. и др. Прогнозное моделирование гидравлического разрыва пласта алюмосиликатными пропантантами, изготовленными на основе буровых шламов // Изв. Том. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334, no. 3, pp. 165—172. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/4081.
- Tretyak A. A., Yatsenko E. A., Doronin S. V. et al. Predictive modeling of hydraulic fracturing by aluminosilicate proppants made based on drill cuttings. Bull. of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering, 2023, vol. 334, no. 3, pp. 165—172. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/4081. (In Russian).
37. Saputri U. S., Suharnoto Yu., Sapei A., Vuegen N. The Utilization of Drill Cutting Waste for Brick Manufacturing. Intern. J. Engineering and Applied Technology (IJEAT), 2020, vol. 3, no. 2, pp. 97—108. DOI: 10.52005/ijeat.v3i2.63.
38. Rasool M. H., Ridha S., Ahmad M. et al. A Mineralogical Perspective on Rare Earth Elements (REEs) Extraction from Drill Cuttings: A Review. Minerals, 2025, vol. 15, no. 5, p. 533. DOI: 10.3390/min15050533.
39. Fontana K. B., Chaves E. S., Araujo R. G. O., de Andrade Maranhão T. Fractionation and Risk Assessment of Rare Earth Elements in Drill Cuttings from Petroleum Wells in Ultra-Deep Waters. Bull. of Environmental Contamination and Toxicology, 2025, vol. 115, no. 1, p. 7. DOI: 10.1007/s00128-025-04079-w.
40. Cherepovitsyn A. E., Dorozhkina I. P., Guseva T. V., Burvikova Yu. N. Problems and institutional framework for the development of the rare earth metals industry in Russia. Tsvetnye Metally, 2024, no. 8, pp. 58—69. DOI: 10.17580/tsm.2024.08.09.
41. Cherepovitsyn A., Lebedev A. Drill Cuttings Disposal Efficiency in Offshore Oil Drilling. J. of Marine Science and Engineering, 2023, vol. 11, no. 2, p. 317. Available at: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/2/317>.
42. Yang J., Sun J., Wang R., Qu Y. Treatment of drilling fluid waste during oil and gas drilling: a review. Environmental Science and Pollution Research, 2023, vol. 30, no. 8, pp. 19662—19682. DOI: 10.1007/s11356-022-25114-x.
43. Kuzmin K. A., Sultanbekov R. R., Khromova S. M. et al. Establishing the influence of recycled used oil on the sedimentation stability of residual marine fuel. Fuel, 2025, vol. 389, p. 134625. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134625.
44. Nevskaya M., Shabalova A., Nikolaichuk L., Kirsanova N. Development of a Quantitative Assessment Algorithm for Operational Risks in Mining Engineering. Resources, 2025, vol. 14, no. 4, p. 53. DOI: 10.3390/resources14040053.
45. Ilyushin Yu. V., Nosova V. A. Development of Mathematical Model for Forecasting the Production Rate. Intern. J. of Engineering, 2025, vol. 38, no. 8, pp. 1749—1757. DOI: 10.5829/ije.2025.38.08b.02.
46. Stroykov G. A., Babyr N. V., Ilin I. V., Marchenko R. S. System of Comprehensive Assessment of Project Risks in the Energy Industry. Intern. J. of Engineering, 2021, vol. 34, no. 7, pp. 1778—1784. DOI: 10.5829/ije.2021.34.07a.22.
47. Ponomarenko T., Marin E., Galevskiy S. Economic Evaluation of Oil and Gas Projects: Justification of Engineering Solutions in the Implementation of Field Development Projects. Energies, 2022, vol. 15, no. 9, p. 3103. DOI: 10.3390/en15093103.
48. Skorobogatov A. A., Pshenin V. V., Tsvetkova C. P., Borisov R. A. Multiphase Oil-water Flow in Horizontal and Inclined Pipelines. Effect of Flow Velocity on Flow Patterns. Intern. J. of Engineering, 2025, vol. 38, no. 8, pp. 1820—1830. DOI: 10.5829/ije.2025.38.08b.08.

Информация об авторах

Лебедев Андрей Павлович, кандидат экономических наук, ассистент, кафедра организации и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2), e-mail: andrey.lebedev.997@mail.ru.

Череповицын Алексей Евгеньевич, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой организации и управления, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2), e-mail: alekseicherepov@inbox.ru.

FROM WASTE TO INFRASTRUCTURE: CIRCULAR ECONOMY STRATEGIES FOR DRILLING WASTE MANAGEMENT IN ARCTIC LNG DEVELOPMENT

Lebedev, A. P., Cherepovitsyn, A. E.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University (Saint Petersburg, Russian Federation)

The article was received on August 8, 2025

For citing

Lebedev A. P., Cherepovitsyn A. E. From Waste to Infrastructure: Circular Economy Strategies for Drilling Waste Management in Arctic LNG Development. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 2, pp. 224—237. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-224-237. (In Russian).

Abstract

The relevance of the study stems from the development of Arctic LNG projects, which generates significant volumes of waste. Traditional waste disposal leads to environmental impacts and high logistical costs, which require the implementation of circular approaches. The study objective is to assess the economic efficiency and risks of processing drilling waste into building materials for the Arctic transport infrastructure projects. The proposed methods for assessing efficiency and risks include the Monte Carlo method, GIS modeling, economic, mathematical and scenario modeling. The novelty of the research lies in its comprehensive approach that makes it possible to quantify the economic efficiency and risks of integrating circular economy principles into the development of the Arctic transport infrastructure through the processing of drilling waste. The proposed methods have been tested in the deposits of the Yamal Peninsula, where the potential volumes of waste processing and the economic effect of their use have been calculated.

Keywords: *industrial development of the Arctic, circular economy, LNG projects, waste management, transport infrastructure, hydrocarbon fields.*

Information about the authors

Lebedev, Andrey Pavlovich, PhD of Economy, Assistant, the Department of Organization and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University (2, 21st Line, Saint Petersburg, Russia, 199106), e-mail: andrey.lebedev.997@mail.ru.

Cherepovitsyn, Alexey Evgenyevich, Dr. of Economy, Head of the Department of Organization and Management, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University (2, 21st Line, Saint Petersburg, Russia, 199106), e-mail: alekseicherepov@inbox.ru.

© Lebedev A. P., Cherepovitsyn A. E., 2026