

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ АРКТИКИ

А. А. Гилярова

Горный институт Кольского научного центра РАН (Апатиты, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2025

Для цитирования

Гилярова А. А. Экономические и экологические эффекты цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 83—94. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-83-94.

Актуальность темы обусловлена широким использованием цифровых технологий и необходимостью оценки их эффективности. Цель работы — анализ экономических и экологических эффектов цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях Арктики. Предложены методы оценки эффектов цифровых технологий: экспертный, учета затрат, сравнительного анализа доходов и прибыли, бенчмаркинга и расчета результирующих финансовых потоков с учетом фактора времени. Новизна исследования заключается в комплексном подходе, позволяющем определять как экономические, так и экологические эффекты цифровых технологий. Предложенные методы опробованы на горнодобывающих предприятиях Кольского региона.

Ключевые слова: Арктика, горнодобывающие предприятия, цифровые технологии, экономические и экологические эффекты, методы оценки.

Введение

Горнодобывающая промышленность Арктики находится на пороге значительных перемен, вызванных повсеместной цифровизацией. В условиях обостряющейся конкуренции и роста экологических требований предприятия вынуждены искать пути для повышения эффективности и устойчивости. Одним из ключевых инструментов для этого стали цифровые технологии (ЦТ), способные радикально изменить производственные процессы, снизить издержки и повысить производительность [1—9].

Несмотря на значительный потенциал цифровизации, оценка экономических и экологических эффектов использования ЦТ остается сложной задачей. Существуют различные методические подходы к оценке, в частности, инвестиционных проектов [10—22], однако их применимость и эффективность требуют глубокого анализа и адаптации к специфике горнодобывающей отрасли. В данной работе выполнен анализ и представлены теоретические основы развития методических подходов, которые позволят более точно и всесторонне оценивать экономические и экологические эффекты использова-

ния ЦТ. Основными целями исследования являются анализ экономических и экологических эффектов ЦТ на горнодобывающих предприятиях Арктики и развитие методических подходов к их оценке. Это поможет предприятиям принимать обоснованные инвестиционные решения и эффективно управлять внедрением ЦТ, учитывая как экономические, так и экологические их эффекты.

Как известно, жизненный цикл горнодобывающего предприятия состоит из нескольких ключевых этапов, для каждого из которых можно привести примеры применения ЦТ. Начальным этапом является геологоразведка, для целей которой могут использоваться беспилотные аппараты для аэрофотосъемки и создания точных карт местности [23]. В [4] приведены примеры использования ЦТ для оценки состояния и мониторинга геометрического развития воронки взрыва природного газа на полуострове Ямал по данным аэрофотосъемки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и дистанционного зондирования Земли. Также применяются платформы для анализа больших объемов данных, позволяющие ускорить процесс разведки и повысить точность прогнозов [2; 3; 8]. Программное обеспечение для

3D-моделирования помогает создавать детализированные модели месторождений, что способствует более точному планированию добычи [6; 8]. На этапе проектирования применяются автоматизированные системы проектирования, такие как AutoCAD, и средства симуляции для проверки инженерных решений [8]. Во время строительства виртуальная реальность используется для подготовки персонала, а БПЛА обеспечивают мониторинг хода работ и геологических процессов [4; 9; 23]. В процессе эксплуатации Интернет вещей и предиктивная аналитика помогают отслеживать состояние оборудования и планировать ремонты, а роботы выполняют опасные и трудоемкие задачи [2; 8]. Завершающий этап — закрытие и рекультивация — сопровождается использованием геоинформационных систем для восстановления нарушенных ландшафтов и мониторинга состояния почвы и воды.

На основе анализа этапов жизненного цикла горнодобывающего предприятия и применения ЦТ, а также с опорой на исследования и определения, представленные в использованных источниках [1—25], в данной работе используются ключевые понятия, перечисленные ниже.

Цифровые технологии — совокупность аппаратных и программных средств, методов и процессов, направленных на сбор, обработку, хранение, передачу и визуализацию данных в электронном формате [1; 8]. ЦТ обеспечивают высокую степень автоматизации и интеллектуализации производственных и управленческих процессов в горнодобывающей промышленности, что способствует повышению эффективности, управляемости и безопасности.

Цифровые решения — комплекс организационно-технических мероприятий, реализуемых с целью внедрения ЦТ в деятельность предприятия [8; 9]. Цифровые решения направлены на достижение конкретных бизнес-целей путем интеграции информационных систем, программного обеспечения и технического оборудования, что позволяет оптимизировать производственные процессы, сократить затраты, повысить производительность и обеспечить устойчивое развитие предприятия.

Экономические эффекты использования цифровых технологий и решений — результат их внедрения, выраженный в форме улучшения финансово-экономических показателей предприятия [24; 25]. Могут проявляться как прямые, так и косвенные экономические эффекты. Прямой экономический эффект — изменение ключевых экономических показателей предприятия, непосредственно связанное с внедрением ЦТ и решений [24]. Прямой эффект выражается в снижении затрат на производство, повышении производительности труда, увеличении объема добычи, росте выручки и чистой прибыли.

Экологические эффекты — положительные изменения, возникающие в результате внедрения ЦТ. Их сложно измерить напрямую, но они оказывают существенное влияние на общие результаты деятельности предприятия [24]. Косвенный эффект проявля-

ется в улучшении репутации компании, повышении безопасности труда, реализации природоохранных мероприятий, улучшении экологической устойчивости и создании благоприятных условий для долгосрочного устойчивого развития.

Автором выполнены систематизация и анализ данных по эффективным цифровым проектам предприятий — номинантов конкурса 2024 г. «Горная индустрия 4.0», проводимого среди предприятий горнодобывающего комплекса России [26]. Цель конкурса — выявление и поощрение лучших проектов цифровизации производственных и бизнес-процессов, а также стимулирование обмена отраслевым опытом и продвижения применения ЦТ с измеримой эффективностью. Данные анализа позволяют составить представление о масштабах и направлениях цифровизации в горнодобывающей отрасли, а также идентифицировать эффекты внедрения ЦТ и решений на предприятиях-участниках.

На основе анализа данных, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод, что экономические и экологические эффекты внедрения ЦТ в горнодобывающей промышленности могут быть как прямыми, так и косвенными. Прямые эффекты проявляются в непосредственной финансовой выгоде предприятия, связанной с уменьшением затрат, увеличением объемов производства и ростом выручки. Косвенные же эффекты оказывают положительное влияние на бизнес в долгосрочной перспективе, способствуя улучшению репутации компании, повышению безопасности труда, снижению негативного воздействия на окружающую среду и созданию условий для устойчивого развития. Проекты, упомянутые в таблице, реализуются на предприятиях, расположенных в Арктической зоне России, характеризующейся суровыми климатическими условиями, что требует особых подходов к внедрению и эксплуатации ЦТ.

Однако, несмотря на очевидные потенциальные выгоды, оценка экономических и экологических эффектов от внедрения ЦТ остается сложной задачей. Хотя такие традиционные методы, как ROI (возврат на инвестиции) и NPV (чистая приведенная стоимость), широко распространены, они не всегда способны учитывать весь спектр выгод и рисков, связанных с внедрением цифровых решений [17; 22; 24]. Эти методы фокусируются преимущественно на краткосрочных финансовых показателях, игнорируя долгосрочные и косвенные эффекты, такие как улучшение репутации, повышение безопасности труда или снижение экологического ущерба, а также не учитывают особенности оценки проектов по внедрению цифровых технологий и решений в арктических северных регионах.

Вопросам и тенденциям внедрения ЦТ на горно-рудных и нефтегазовых предприятиях Арктики на современном этапе посвящен целый ряд исследований, среди которых необходимо выделить [1—5]. В отдельных работах рассмотрены особенности цифровизации технологических процессов [6; 7], а также обосновывается необходимость обеспе-

чения технологической независимости в горнодобывающей отрасли [8]. Проблемы и перспективы цифровизации горнодобывающей промышленности на региональном уровне, особенно для Арктической зоны, затронуты в статьях [9; 10]. В зарубежных исследованиях цифровая трансформация рассматривается как развитие «Индустрии 4.0» в части финансовых инструментов и эффектов [5; 11—14]. В России и Белоруссии выполнены проработки по оценке как уровня цифровизации предприятия, так и получаемых или ожидаемых эффектов [15—17]. При этом предлагаются некоторые методические

подходы как к оценке эффектов в целом [15; 16—19], так и по вопросам инвестирования в ЦТ [20]. Применительно к методам оценки экономических и экологических эффектов цифровой трансформации в горнодобывающей промышленности Арктики необходимо отметить работы [21—25; 27]. При этом определенное внимание уделяется рискам, в том числе обусловленным цифровой трансформацией горной промышленности.

Авторы статьи [10] проанализировали процесс оценки проектов внедрения цифровых технологий в арктических регионах, уделяя особое внимание

Таблица 1. Эффекты цифровых технологий на горнопромышленных предприятиях Арктики (по [26])

Table 1. Effects of digital technologies at the Arctic mining enterprises (based on [26])

Предприятие	Проект	Экологические и косвенные эффекты	Экономические эффекты
АО «Евраз ГТМК»	Цифровая система диспетчеризации аварийных ремонтов	Улучшение информационной поддержки управленческих решений, повышение достоверности данных	Повышение производительности предприятия/цеха/передела до 15%
ООО «КРУ-Взрывпром»	Цифровизация буровзрывных работ	Новые возможности для анализа работы предприятия, повышение безопасности ведения работ	Экономический эффект менее чем за год
АК «АЛРОСА» (ПАО)	Повышение операционной эффективности работы россыпных приисков	Получение прозрачных данных, управление процессом в режиме онлайн, разработка мероприятий по повышению эффективности	Рост коэффициента использования автосамосвалов на 25%, рост производительности на 17%
Заполярный филиал ПАО «ГМК «Норильский никель»	Аппаратно-программный комплекс	Стабилизация качества сырья, учет в технологическом процессе	Повышение точности учета до 98—99%, стабилизация качества рудопотока
АО «Томинский ГОК» (РМК)	Цифровая платформа «Помощник флотатора»	Автоматическое управление процессом флотации по заложенным в цифровую платформу алгоритма	Увеличение коэффициента технологического извлечения меди на 0,52%
ООО «Пикалевский глиноземный завод» (РУСАЛ)	Цифровая печь спекания: советчик агломератчика	Управление печами спекания на основе оперативных данных, исключение субъективности в управлении процессом спекания	Увеличение выхода с 85% до 90%, улучшение качества химического выхода
ООО «ГРК «Быстринское»	Глубинная высококоразрешающая импульсная электро-разведка (ГВИЭР)	Сокращение времени на выполнение операций по уточнению опасных аномалий и нарушений, всесезонность и более высокая точность изысканий по сравнению с классическими методами геофизики	Улучшение управляемости безопасностью при ведении горных работ в карьерах и эксплуатации гидротехнических сооружений
ООО «Земтек Майнинг»	Оценка и обучение машинистов экскаваторов	Более качественный отсев кандидатов с низкими практическими навыками работы на экскаваторе, выявление у сотрудников отклонений навыка проведения ежедневного технического обслуживания от утвержденного стандарта. Снижение текучести персонала	Снижение фактических затрат на аварийный ремонт экскаваторной техники на 26%, снижение затрат на логистику персонала на 18%

Предприятие	Проект	Экологические и косвенные эффекты	Экономические эффекты
АО «Русал Менеджмент»	Обучающая и краудсорсинговая платформа «Цифровой алюминий»	На платформе собран уникальный контент, адаптированный для алюминиевой отрасли, где на примере предприятий РУСАЛа объясняется, как «Индустрия 4.0» позволяет повышать эффективность	За год обучение прошли 85% специалистов при плане 70%, количество идей за год выросло с 300 до 8000, увеличился процент идей, которые доходят до стадии реализации
ЛМЗ «СКАД» (РУСАЛ)	Система машинного зрения «Светофор опасной зоны»	Автоматический светофор сообщает сотрудникам о наличии опасности, случаи травматизма не выявлены. В первое время после запуска системы в день приходило до 15 уведомлений о нарушениях сотрудниками правил безопасности. Сейчас, когда проект работает в течение полугода, число нарушений сократилось до 1—2 в день	Система машинного зрения распознает появление погрузчика в размеченной зоне и отправляет сигнал на светофор: красный сигнал светофора предупреждает работников об опасности. Случаи травматизма не выявлены
АО «Кольская ГМК»	Предиктивная диагностика и контроль эксплуатации техники самоходного оборудования	Внедрен мониторинг состояния техники (индекс здоровья). Обеспечен контроль нарушений эксплуатации техники оператором. Создана математическая модель по отказу двигателя	Сокращение капитальных затрат при сохранении количественных и качественных параметров производства
ООО «ГРК «Быстринское»	«Выжать из мельницы всё!»	На основании данных по работе измельчения за два года создана математическая модель управления для одной из двух мельниц самоизмельчения, разработана система на основе искусственного интеллекта для оптимизации процесса измельчения	Увеличение производительности передела измельчения на 2,64% (+293 тыс. т переработки руды в 2023 г.). Уменьшение удельного расхода электроэнергии на тонну руды на 1,2%. снижение числа ошибок в рутинных процессах

Примечание. Составлено автором.

Note. Compiled by the author.

влиянию уникальных условий на выбор методов и подходов. Важнейшие особенности таковы:

- суровые климатические условия, такие как низкие температуры, сильные ветра и вечная мерзлота, требуют адаптации технологий и оборудования;
- ограниченная транспортная инфраструктура приводит к зависимости от авиационного и морского транспорта, а также железнодорожного, гусеничного транспорта, которые уязвимы по отношению к погодным и сезонным изменениям;
- из-за отсутствия централизованных электросетей особую значимость приобретают автономные источники энергии — солнечные батареи, ветровые турбины и дизельные генераторы;
- оборудование должно быть способно выдерживать экстремальные температурные нагрузки и интегрироваться с системами дистанционного управления;
- сложная природная среда требует тщательной разработки планов по минимизации угроз и обеспечению готовности к чрезвычайным ситуациям.

Несмотря на высокие первоначальные капитальные затраты, внедрение ЦТ в арктических регионах может привести к значительным долгосрочным экономическим выгодам благодаря оптимизации производственных процессов и снижению операционных расходов.

Эти аспекты подчеркивают необходимость комплексного подхода к оценке проектов, учитывающего технические, социальные и экологические факторы.

Методы и подходы

В связи с изложенным становится актуальным развитие методических подходов, позволяющих более точно оценивать экономические и экологические эффекты внедрения ЦТ в горнодобывающей промышленности.

В настоящей работе концепция совершенствования и развития методических подходов к оценке эффектов ЦТ заключалась в адаптации и обосновании применимости (как автономно, так и комплексно)

рованием) пяти методов: экспертного, учета затрат, сравнения, бенчмаркинга, расчета результирующих финансовых потоков с учетом фактора времени.

Экспертный метод заключается в привлечении специалистов для оценки экономической и экологической эффективности внедрения ЦТ [24]. Эксперты анализируют соответствующие характеристики цифровых решений, а также учитывают опыт других компаний в данной области.

Метод учета затрат основан на расчете инвестиций непосредственно на внедрение и эксплуатацию ЦТ [21; 22; 24]. Он позволяет выявить изменения в затратах на производство, энергию и материалы, природоохранные мероприятия, а также на другие факторы, влияющие на экономическую и экологическую эффективность, и тем самым опосредованно оценить ожидаемое сокращение затрат на производство и реализацию продукции.

Метод сравнительного анализа ожидаемых доходов и прибыли основывается на анализе показателей работы предприятия до и после внедрения ЦТ, а также ожидаемого прироста доходов от их использования [21; 22; 24]. Метод позволяет выявить изменения в объемах производства, затратах на энергию и материалы, а также другие факторы, влияющие на экономическую и экологическую эффективность.

Метод бенчмаркинга заключается в сравнении показателей работы предприятия с аналогичными показателями других компаний, успешно использующих ЦТ [27].

Метод расчета результирующих финансовых потоков заключается в расчетах годовых показателей затрат, дохода и прибыли (после уплаты налогов и нормируемых отчислений, в том числе на природоохранные мероприятия) и формировании аккумулирующих их значений с учетом фактора времени [24; 28].

Результаты

На основе выполненного исследования развиты и усовершенствованы принятые в данной работе методические подходы к оценке экономических и экологических эффектов использования ЦТ на горнодобывающих предприятиях Арктики. Суть совершенствования методов заключается в нижеприведенных описаниях каждого метода.

Для экспертного метода необходимо привлечь не менее трех экспертов — горных инженеров и ученых. Метод заключается в определении рейтинга балльных оценок, как по горно-геологическим, технико-экономическим и экологическим показателям, так и по уровню автоматизации, роботизации и применению ЦТ для рассматриваемого предприятия (рис. 1). Для каждого показателя проводится экспертная оценка, после чего ему присваивается определенное число баллов. Затем находятся суммы баллов для групп показателей, и далее формируется общая сумма экспертных баллов. Эта сумма экспертных баллов проверяется на выполнение логического условия сравнения с максимально возможной

$\Sigma \text{э. б.} \geq 0,7 \Sigma \text{max}$ (более двух третей от максимальной суммы), и в зависимости от выполнения заданного условия делается вывод об эффективности использования ЦТ. Метод рейтинга балльных оценок опробован и верифицирован применительно к горнодобывающей промышленности Арктики в [23].

Кроме того, экспертный метод включает в себя оценку рисков как применения цифровых технологий в целом, так и применения зарубежных программных средств в современных геополитических условиях. Минимизация рисков позволит повысить технологическую независимость предприятий горнодобывающих предприятий России.

Согласно «ГОСТ Р ИСО 31000-2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство» (введен с 01.09.2011. — М.: Стандартинформ, 2012), оценка риска включает: идентификацию риска (процесс обнаружения, распознавания источников, событий, их причин и возможных последствий риска), анализ риска и непосредственно оценивание риска. Вероятность P (возможность рискованного события), согласно теории менеджмента риска, принимается «...независимо от того, установлено ли это, измерено или определено объективно или субъективно, качественно или количественно, и описывается ли с помощью общих понятий или математически (например, как вероятность или частота за данный период времени)» (п. 2.19). Значение P определяется на основе опыта и экспертных оценок специалистов горного дела, включая геологов, технологов и экологов.

Последствия риска V представляют собой экологические риски, экономические потери, нарушения технологического процесса и сбои в добыче полезных ископаемых, которые возникают при неблагоприятном сценарии использования ЦТ на горнодобывающих предприятиях Арктики, и варьируются от небольших отклонений до серьезных экологических нарушений и полной остановки производства. Параметр V должен задаваться экспертами на основе оценки потенциальных экологических рисков, связанных с нарушениями технологических процессов предприятия, авариями, выбросами загрязняющих веществ, нарушением экосистем Арктики, потерями в добыче ресурсов и иными негативными последствиями, способными существенно снизить эффективность деятельности предприятия. Значения параметра могут быть выражены в баллах или представлены качественным описанием степени серьезности последствий (например, низкий, умеренный, высокий).

Концепция экспертного метода оценки рисков использования цифровых решений на горнодобывающем предприятии заключается в определении рейтинговой балльной оценки (рис. 2):

$$R = PVT,$$

где R — рейтинговая балльная оценка; P — вероятность возникновения риска; V — последствия; T — продолжительность проблемы.

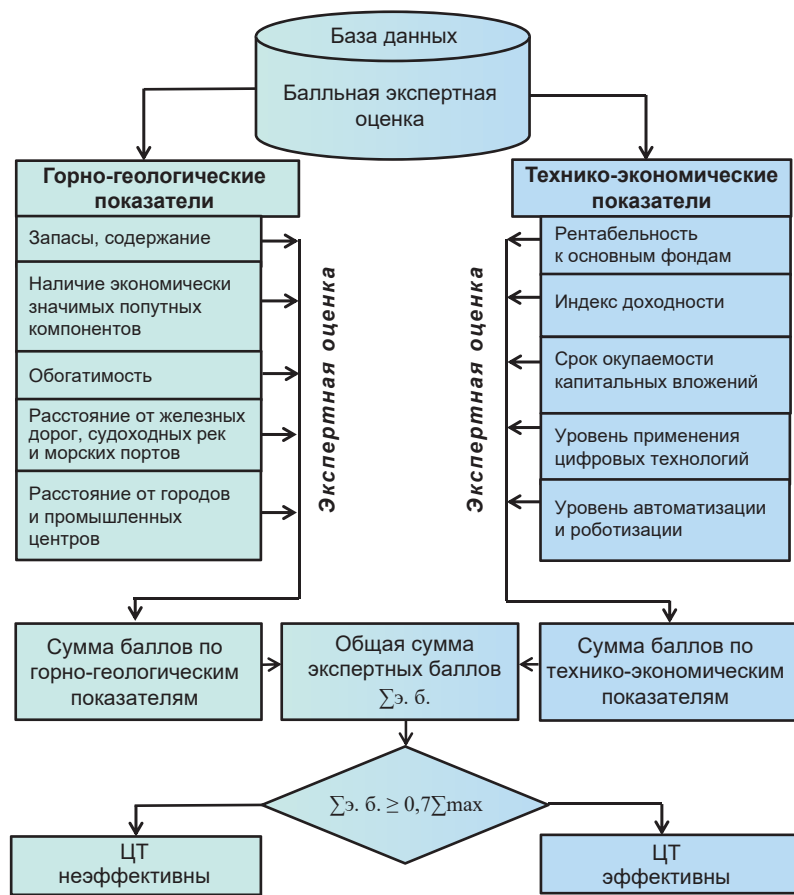


Рис. 1. Экспертный метод оценки эффективности использования цифровых технологий на горнодобывающем предприятии (составлено автором)
Fig. 1. Expert method for assessing the effectiveness of using digital technologies at a mining enterprise (compiled by the author)

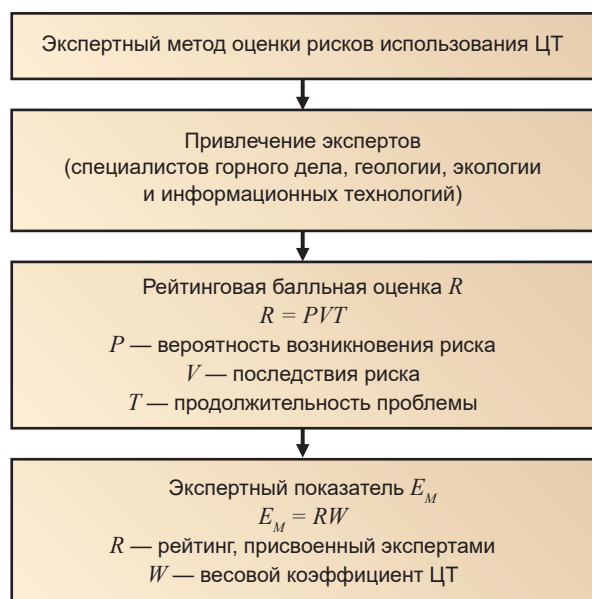


Рис. 2. Концепция экспертного метода оценки рисков использования цифровых технологий (составлено автором)
Fig. 2. The concept of an expert method for assessing the risks of using digital technologies (compiled by the author)

Значения экспертного показателя (экспертной оценки) находятся по формуле

$$E_M = RW,$$

где E_M — экспертный показатель; R — рейтинг, присвоенный экспертами по каждому цифровому решению; W — весовой коэффициент, отражающий его значимость.

Под W понимается коэффициент, отражающий значимость оцениваемого цифрового решения в общем пакете ЦТ горнодобывающего предприятия.

Следует отметить, что категорирование рисков использования ЦТ по уровням с учетом современных геополитических условий, импорта, независимости и кибербезопасности является самостоятельной очень важной задачей, выходящей за пределы данного исследования.

Метод расчета затрат оценки эффективности использования ЦТ на горнодобывающем предприятии базируется на определении ожидаемого прироста доходов за счет сокращения затрат вследствие применения ЦТ, но при этом с учетом совокупности затрат на их внедрение (покупка, установка, обучение персонала, поддержка и обслуживание, прочие расходы, связанные с внедрением ЦТ) и стоимости владения соответствующей инфраструктурой (каждого компонента, времени использования, сопровождения, поддержки, обслуживания и других затрат по инфраструктуре ЦТ) посредством сопоставления с затратами на производство и реализацию продукции до внедрения ЦТ (рис. 3).

Количественный показатель эффективности использования ЦТ по методу расчета затрат предлагается определять как отношение разницы затрат при использовании ЦТ и без использования ЦТ к затратам без ЦТ:

$$П_3 = \frac{3_1 - 3_0}{3_0},$$

где $П_3$ — количественный показатель эффективности; 3_1 — затраты на производство и реализацию продукции при использовании ЦТ; 3_0 — затраты на производство и реализацию продукции без использования ЦТ.

Метод сравнительного анализа ожидаемых доходов и прибыли предлагается направить на анализ финансовых показателей работы горнодобывающего предприятия до и после внедрения ЦТ, а также оценки ожидаемого прироста доходов от их использования (рис. 4). В таком применении метод позволит

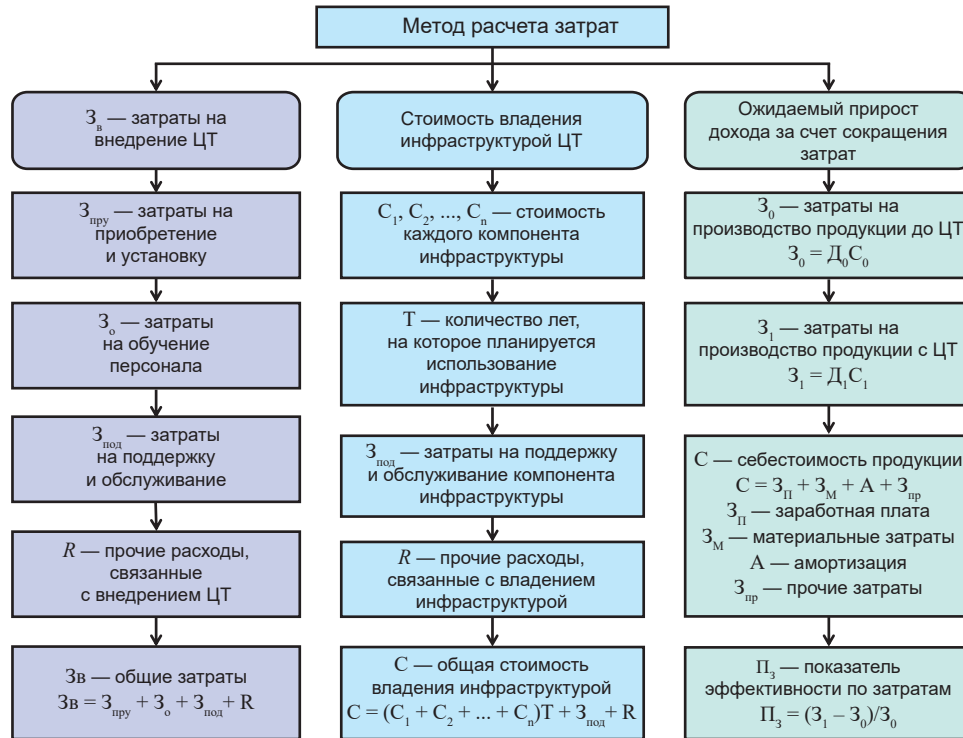


Рис. 3. Метод расчета затрат для оценки эффективности использования цифровых технологий на горнодобывающем предприятии (составлено автором)

Fig. 3. Cost calculation method for assessing the efficiency of using digital technologies at a mining enterprise (compiled by the author)

определить тенденции в формировании доходов производства от реализации производимого продукта с использованием ЦТ, а также выявить факторы ЦТ, влияющие на экономическую и экологическую эффективность работы предприятия.

Количественный показатель сравнительного анализа ожидаемых доходов и прибыли предлагается определять по формуле

$$\Pi_{\text{ср}} = \frac{\Pi_1 - \Pi_0}{\Pi_0},$$

где $\Pi_{\text{ср}}$ — количественный показатель эффективности; Π_1 — прибыль предприятия при использовании ЦТ; Π_0 — прибыль предприятия без использования ЦТ.

Метод бенчмаркинга рекомендуется использовать для сравнения показателей работы предприятия, на котором используются ЦТ, с показателями аналогичных предприятий, успешно использующих ЦТ (рис. 5). При этом желательно рассматривать предприятия, аналогичные как по добываемому минеральному сы-

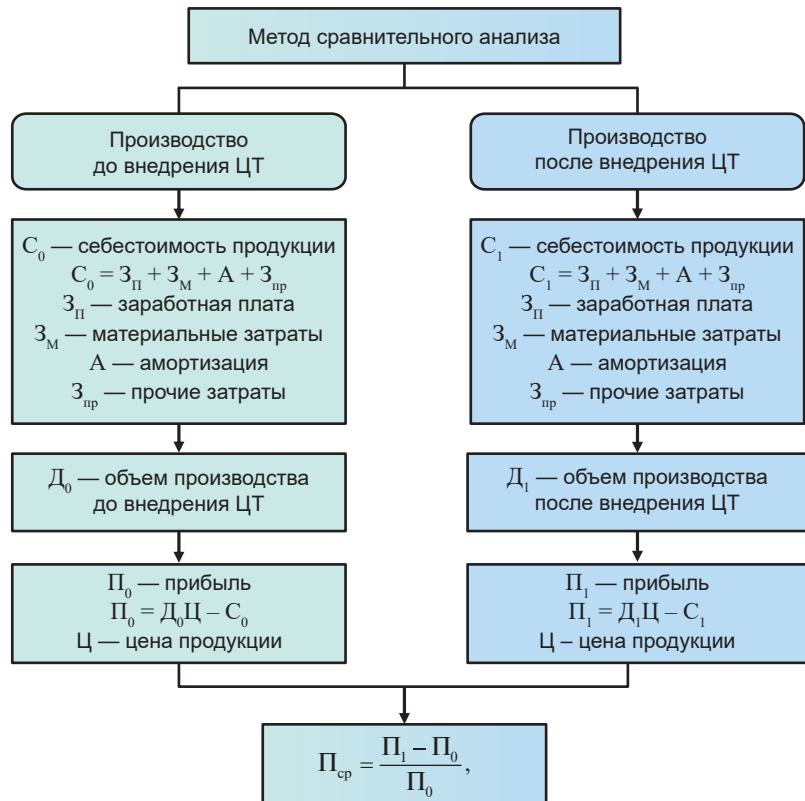


Рис. 4. Метод сравнительного анализа для оценки эффективности использования цифровых технологий (составлено автором)

Fig. 4. Method of comparative analysis for assessing the effectiveness of using digital technologies (compiled by the author)

рию и основному производимому продукту, так и по уровню цифровизации.

Для оценки экономической эффективности использования ЦТ по методу бенчмаркинга предлагается определять количественный показатель эффективности B_M как отношение разности сравниваемых показателей (например, прибыли) оцениваемого предприятия и предприятия-аналога к показателю предприятия-аналога [27]:

$$B_M = \frac{\Pi_{\Pi} - \Pi_A}{\Pi_A},$$

где B_M — показатель эффективности по методу бенчмаркинга; Π_{Π} — прибыль оцениваемого предприятия, использующего ЦТ; Π_A — прибыль предприятия-аналога, успешно использующего ЦТ.

Метод расчета результирующих финансовых потоков с учетом фактора времени применительно к оценке эффективности использования ЦТ горнодобывающим предприятием предлагается реализовать на основе расчетов годовых показателей затрат, дохода и прибыли (после вычета налогов и нормируемых отчислений, в том числе на природоохранные мероприятия) и формировании аккумулирующих их значений для заданного горизонта расчета (рис. 6).

В этом случае оценка экономических и экологических эффектов будет базироваться на сопоставительном анализе дисконтированных денежных потоков для базового сценария и сценариев с различным уровнем использования предприятием ЦТ [22].

В методе расчета результирующих финансовых потоков экономические эффекты использования цифровых решений для расчетного года определяются путем сопоставления дохода и затрат для сценариев с использованием ЦТ и без цифровизации.

Показатели экономических эффектов использования ЦТ для каждого расчетного года будут рассчитываться по формуле (составлена автором):

$$\Xi_{\text{ЦТ}} = (ДД_{\text{ЦТ}} - K_0 - И_{\text{ЦТ}} - З_{\text{ЦТ}} - И_{\text{ЦТ}}) O_{\text{ЦТ}} - (ДД - K_0 - З) O,$$

где $\Xi_{\text{ЦТ}}$ — экономические эффекты от использования ЦТ; $ДД_{\text{ЦТ}}$ — дисконтированный доход от реализации единицы продукции, полученный с применением ЦТ; K_0 — удельные капитальные затраты; $И_{\text{ЦТ}}$ — удельные инвестиции на ЦТ; $З_{\text{ЦТ}}$ — дисконтированные затраты на производство единицы продукции при ЦТ; $И_{\text{ЦТ}}$ — дисконтированные удельные инвестиции на развитие ЦТ; $O_{\text{ЦТ}}$ — объем производства с применением ЦТ; $ДД$ — дисконтированный доход от реализации единицы продукции без ЦТ; $З$ — дисконтированные удельные затраты на производство продукции без ЦТ; O — объем производства без применения ЦТ.

Обсуждение

Таким образом, выполненное развитие подходов к оценке экономических и экологических эффектов использования цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях методически предполагает комплексное применение усовершенствованных пяти методов: экспертного, расчета затрат, сравнительного анализа дохода и прибыли, бенчмаркинга и расчета результирующих финансовых потоков с учетом фактора времени. Методы оценки экономической и экологической эффективности использования ЦТ могут использоваться как автономно, так и в различных сочетаниях и комплексно, что повышает детальность и достоверность результатов оценки прямых и косвенных эффектов (см. рис. 6).

Основным условием эффективности использования ЦТ на горнодобывающем предприятии будет являться положительное

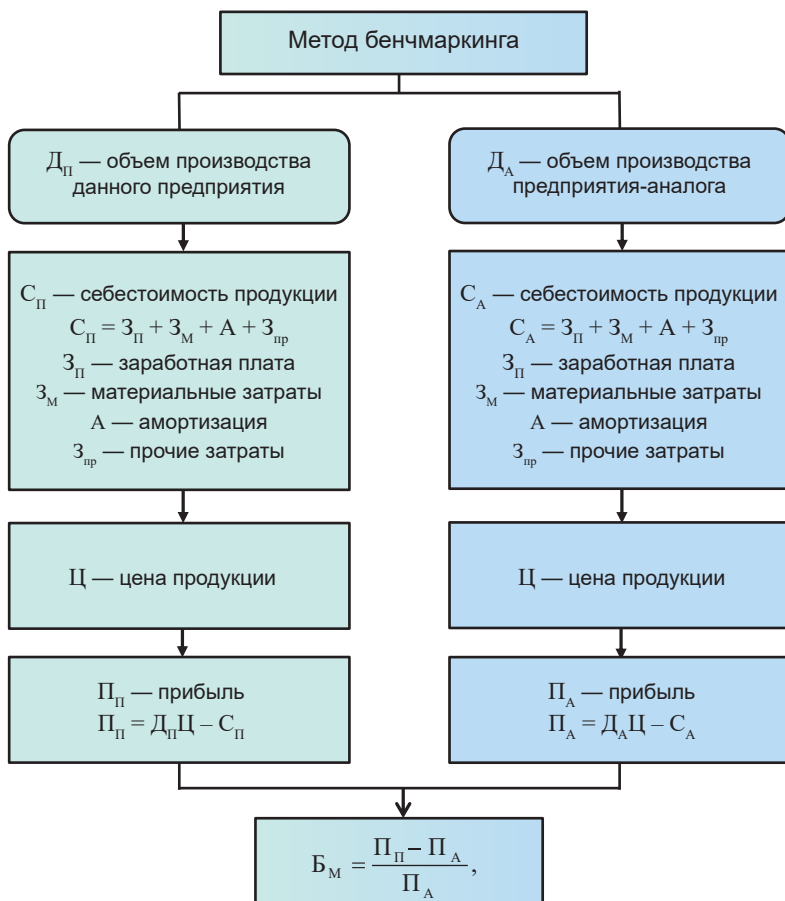


Рис. 5. Метод бенчмаркинга для оценки эффективности использования цифровых технологий (составлено автором)
Fig. 5. Benchmarking method for assessing the efficiency of using digital technologies (compiled by the author)

значение показателя, определяемого по соответствующему описанному выше методу. При этом чем выше значение показателя, тем использование цифровых технологий будет экономически и экологически эффективнее.

С использованием предлагаемых методических подходов определяются как прямой экономический (дополнительная прибыль, снижение издержек, повышение производительности), так и косвенный (научно-технический, социальный, повышение безопасности), а также экологический эффекты. При выполнении логических условий и положительных величинах показателей применение ЦТ даст предприятию позитивный эффект.

В случае одновременного выполнения условий получения как экономических, так и экологических эффектов применение ЦТ будет наиболее эффективным.

Выводы

Выполнен анализ эффективности применения цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях Арктики. Выявлено, что экономические и экологические эффекты ЦТ в горнодобывающей промышленности могут быть как прямыми, так и косвенными.

Развиты методические подходы к оценке экономических и экологических эффектов ЦТ в горнодобывающей промышленности, заключающиеся в усовершенствовании пяти методов: экспертной оценки, учета затрат, сравнительного анализа ожидаемых доходов и прибыли, бенчмаркинга и анализа результирующих финансовых потоков с учетом фактора времени. Эти методы могут использоваться как автономно, так и в различных сочетаниях и комплексировании, что повышает детальность и достоверность результатов оценки прямых и косвенных экономических и экологических эффектов. Обоснована целесообразность одновременного выполнения условий получения как прямых, так и косвенных эффектов — в таком случае применение ЦТ на предприятии будет более эффективным.

Теоретическая значимость данной работы определяется развитием, совершенствованием и возможностью комплексирования методических подходов к оценке экономических и экологических эффектов использования ЦТ на горнодобывающих предприятиях Арктики.

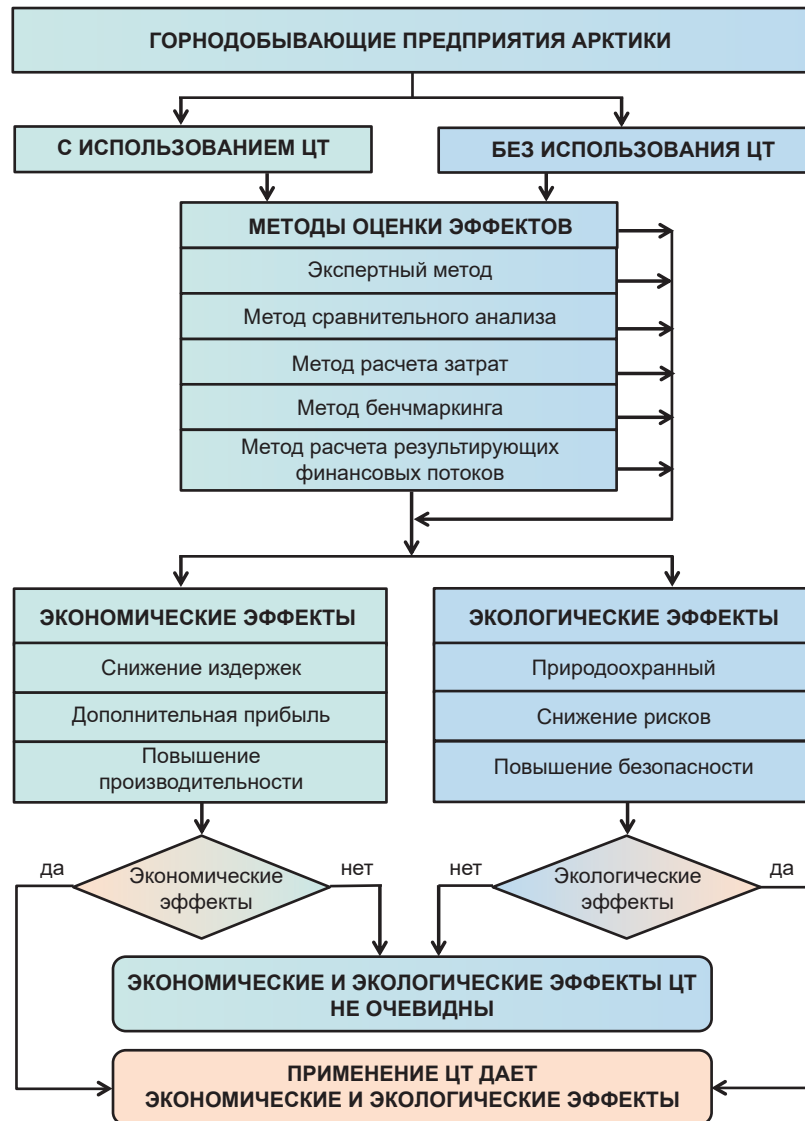


Рис. 6. Оценка экономических и экологических эффектов цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях Арктики (составлено автором)

Fig. 6. Assessment of the economic and environmental effects of DT at the Arctic mining enterprises (compiled by the author)

Практическая значимость заключается в создании информационной основы, дающей руководителям предприятий наглядное и емкое представление о выгодах использования ЦТ в технологических процессах горного производства для принятия обоснованного решения по их реальному применению.

Дальнейшее направление исследований включает совершенствование предложенных методических подходов, их адаптацию к специфике различных горнодобывающих предприятий и интеграцию в системы управления для повышения точности оценки и эффективности использования ЦТ.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках темы НИР FMEZ-2025-0050 «Развитие методологии комплексного решения задач горной технологии в еди-

ном цифровом пространстве горнодобывающего предприятия».

Литература/References

1. Балашов А. М. Внедрение современных цифровых технологий на горнодобывающих предприятиях // Гор. пром-сть. — 2022. — № 6. — С. 83—86. — URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-83-86>. Balashov A. M. Implementation of modern digital technologies in mining enterprises. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], 2022, no. 6, pp. 83—86. Available at: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-83-86>. (In Russian).
2. Barnewold L., Lottermoser B. G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. *Intern. J. of Mining Science and Technology*, 2020, vol. 30, iss. 6, pp. 747—757. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.003>.
3. Дмитриевский А. Н., Ерёмин Н. А., Черников А. Д. Цифровая модернизация нефтегазодобычи: инструменты и индикаторы развития // Экспозиция Нефть Газ. — 2024. — № 1. — С. 44—47. — URL: <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2024-1-44-47>. Dmitrievskii A. N., Eremin N. A., Chernikov A. D. Digital modernization of oil and gas production: tools and indicators of development. *Ekspozitsiya Neft' Gaz* [Oil and Gas Exhibition], 2024, no. 1, pp. 44—47. Available at: <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2024-1-44-47>. (In Russian).
4. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа C22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 320—333. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Monitoring the development of the C22 gas explosion doublet object on the Yamal Peninsula based on Earth remote sensing data. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 320—333. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-320-333. (In Russian).
5. Lund E., Pekkari A., Johansson J. et al. Mining 4.0 and its effects on work environment, competence, organisation and society — a scoping review. *Miner Econs*. Springer. Published 28.02.2024. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00427-0>.
6. Хопунов Э. А. Цифровизация технологий недропользования // Изв. вузов. Гор. журн. — 2021. — № 2. — С. 70—78. — URL: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-2-70-78>. Khopunov E. A. Digitization of subsoil use technologies. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal* [University news. Mining magazine], 2021, no. 2, pp. 70—78. Available at: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-2-70-78>. (In Russian).
7. Великанов В. С., Дремин А. В., Лукашук О. А. и др. Цифровая трансформация горнодобывающих предприятий и теротехнология наземных транспортных средств // Гор. оборудование и электромеханика. —

2024. — № 1 (171). — С. 50—56. — URL: <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-1-50-56>. Velikanov V. S., Dremmin A. V., Lukashuk O. A., Chernukhin S. A., Lukashuk M. D. Digital transformation of mining enterprises and ground vehicle technology. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2024, no. 1 (171), pp. 50—56. Available at: <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2024-1-50-56>. (In Russian).
8. Лукичев С. В., Наговицын О. В. Цифровая трансформация и технологическая независимость в горнодобывающей отрасли // Гор. пром-сть. — 2022. — № 5. — С. 74—78. — URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-74-78>. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V. Digital transformation and technological independence in the mining industry. *Gornaya promyshlennost'* [Mining industry], 2022, no. 5, pp. 74—78. Available at: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-74-78>. (In Russian).
9. Тюленева Т. А. Цифровизация горнодобывающей промышленности региона: проблемы и перспективы // Вестн. Сургут. гос. ун-та. — 2020. — № 4. — С. 25—33. — URL: <https://doi.org/10.34822/2312-3419-2020-4-25-33>. Tyuleneva T. A. Digitization of the regional mining industry: problems and prospects. *Vestnik Surgutskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Surgut State University], 2020, no. 4, pp. 25—33. Available at: <https://doi.org/10.34822/2312-3419-2020-4-25-33>. (In Russian).
10. Лукичев С. В., Наговицын О. В., Чуркин О. Е., Гулярова А. А. Применение цифровых технологий для инвестиционной оценки горнорудных проектов западной части Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 4, pp. 524—537. — URL: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-524-537>. Lukichev S. V., Nagovitsyn O. V., Churkin O. E., Gilyarova A. A. Application of digital technologies for investment evaluation of mining projects in the western part of the Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 524—537. Available at: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-524-537>. (In Russian).
11. Alkaraan F., Albitar K., Hussainey K., Venkatesh V. G. Corporate transformation toward Industry 4.0 and financial performance: The influence of environmental, social, and governance (ESG). *Technological Forecasting and Social Change*, 2022, vol. 175. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121423>.
12. Gajdzik B., Wolniak R. Smart production workers in terms of creativity and innovation: The implication for open innovation. *J. of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2022, vol. 8, iss. 2, p. 68. Available at: <https://doi.org/10.3390/joitmc8020068>.
13. Gueye E. H. M., Badri A., Boudreau-Trudel B. Sustainable development in the mining industry: towards the development of tools for evaluating socioeconomic impact in the Canadian context. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, vol. 23 (5), pp. 6576—6602. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00948-y>.
14. Hodge R. A., Ericsson M., Löf O. et al. The global mining industry: corporate profile, complexity, and change.

- Miner Econ., 2022, no. 35, pp. 587—606. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13563-022-00343-1>.
15. Илькевич С. В. Стратегия цифровой трансформации промышленных предприятий: эффекты внедрения технологий умного производства // Стратег. решения и риск-менеджмент. — 2022. — Т. 13, вып. 3. — С. 210—225. — URL: <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-3-210-225>.
- Il'kevich S. V. Strategy of digital transformation of industrial enterprises: effects of smart manufacturing implementation. Strategicheskie resheniya i risk-meneditzhment [Strategic decisions and risk management], 2022, vol. 13, iss. 3, pp. 210—225. Available at: <https://doi.org/10.17747/2618-947X-2022-3-210-225>. (In Russian).
16. Потетенко С. В. Оценка уровня цифровизации предприятий (организаций) и отраслей. — URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2020/03_Minsk/Presentations/ITU%20Workshop%204%20March%202020%20-%20Sergey%20Potetenko.pdf.
- Potetenko S. V. Assessment of the level of digitalization of enterprises (organizations) and industries. Available at: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/CIS/Documents/Events/2020/03_Minsk/Presentations/ITU%20Workshop%204%20March%202020%20-%20Sergey%20Potetenko.pdf. (In Russian).
17. Yurak V. V., Polyanskaya I. G., Malyshev A. N. The assessment of the level of digitalization and digital transformation of oil and gas industry of the Russian Federation. Mining Science and Technology (Russia), 2023, vol. 8, iss. 1, pp. 87—110. Available at: <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-08-16>.
18. Мерзлов И. Ю., Шилова Е. В., Санникова Е. А., Сединин М. А. Комплексная методика оценки уровня цифровизации организаций // Экономика, предпринимательство и право. — 2020. — Т. 10, № 9. — С. 2379—2396. — URL: <https://doi.org/10.18334/epp.10.9.110856>.
- Merzlov I. Yu., Shilova E. V., Sannikova E. A., Sedinin M. A. A comprehensive methodology for assessing the level of digitalization of organizations. Ekonomika, predprinimatel'stvo i pravo [Economics, entrepreneurship and law], 2020, vol. 10, no. 9, pp. 2379—2396. Available at: <https://doi.org/10.18334/epp.10.9.110856>. (In Russian).
19. Литвин И. Ю. Эффекты внедрения цифровых технологий на промышленном предприятии // Инновац. развитие экономики. — 2021. — № 6 (66). — С. 42—47. — DOI: 10.51832/2223-7984-2021-6-42.
- Litvin I. Yu. Effects of implementing digital technologies in an industrial enterprise. Innovatsionnoe razvitie ekonomiki [Innovative development of the economy], 2021, no. 6 (66), pp. 42—47. DOI: 10.51832/2223-7984-2021-6-42. (In Russian).
20. Гулый И. М. Подход к оценке экономических эффектов инвестирования в цифровые технологии // Финансы и кредит. — 2019. — Т. 25, № 12. — С. 2878—2888. — URL: <https://doi.org/10.24891/fc.25.12.2878>.
- Gulyi I. M. Approach to assessing economic effects of investing in digital technologies. Finansy i kredit [Finance and credit], 2019, vol. 25, no. 12, pp. 2878—2888. Available at: <https://doi.org/10.24891/fc.25.12.2878>. (In Russian).
21. Евлашкина С. А. Экономический эффект от внедрения цифровых технологий в горнодобывающей отрасли // Стратегии бизнеса. — 2021. — Т. 9, № 10. — С. 296—300.
- Evlashkina S. A. Economic effect from the introduction of digital technologies in the mining industry. Strategii biznesa [Business strategies], 2021, vol. 9, no. 10, pp. 296—300. (In Russian).
22. Мелешко Ю. В. Оценка экономической эффективности внедрения цифровых технологий на коммерческом предприятии горной промышленности // Вестн. Ин-та экономики НАН Беларуси. — 2022. — № 4. — С. 120—152.
- Meleshko Yu. V. Evaluation of the economic efficiency of introducing digital technologies in a commercial mining enterprise. Vestnik Instituta ekonomiki NAN Belarusi [Bulletin of the Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus], 2022, no. 4, pp. 120—152. (In Russian).
23. Теплов Д. К. Применение беспилотных летательных аппаратов в строительстве: современные решения и возможности // Молодой ученый. — 2024. — № 20 (519). — С. 77—80. — URL: <https://moluch.ru/archive/519/114339/>.
- Teplov D. K. The use of unmanned aerial vehicles in construction: current solutions and opportunities. Molodoy ucheniy [Young scientist], 2024, no. 20 (519), pp. 77—80. Available at: <https://moluch.ru/archive/519/114339/>. (In Russian).
24. Гилярова А. А. Экономические эффекты применения цифровых решений в горной промышленности (на примере западной части Арктики) // Гор. пром-сть. — 2023. — № 6. — С. 95—102. — URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-95-102>.
- Gilyarova A. A. Economic effects of applying digital solutions in the mining industry (on the example of the western part of the Arctic). Gornaya promyshlennost' [Mining industry], 2023, no. 6, pp. 95—102. Available at: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-95-102>. (In Russian).
25. Petroutsatou K., Antoniou F., Markoulatos E. S. Qualitative prioritization of accident risks in the mining industry. Life Cycle Reliab Saf Eng., 2024, no. 13, pp. 483—503. DOI: 10.1007/s41872-024-00276-4.
26. Эффективные цифровые проекты горнодобывающих предприятий — номинанты конкурса 2024 года «Горная индустрия 4.0». — URL: <https://digitalmining.ru/>.
- Effective digital projects of mining enterprises — nominees of the competition 2024 "Mining Industry 4.0". Available at: <https://digitalmining.ru/>.
27. Мухетдинова В. В. Бенчмаркинг как инновационный метод выработки стратегических решений на предприятиях нефтетранспортной отрасли // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: Материалы Международной научно-практической конференции

студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. — [Б. м.], 2016. — С. 408—411.

Mukhetdinova V. V. Benchmarking as an innovative method for developing strategic solutions in the oil transportation industry. Energy Saving and Innovative Technologies in the Fuel and Energy Complex. Materials of the International Scientific and Practical Conference

of Students, Postgraduates, Young Scientists and Specialists. [S. l.], 2016, pp. 408—411. (In Russian).

28. Kyunghwan Oh, Hyeongseog Kho, Youngjin Choi, Seogjun Lee. Determinants for Successful Digital Transformation. Sustainability, 2022, vol. 14, iss. 3, no. 1215. DOI:10.3390/su14031215.

Информация об авторе

Гильярова Ася Анатольевна, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра РАН (184200, Россия, Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24), e-mail: a.gilyarova@ksc.ru.

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EFFECTS OF DIGITAL TECHNOLOGIES AT THE ARCTIC MINING ENTERPRISES

Giliarova, A. A.

Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science (Apatity, Russia Federation)

The article was received on April 14, 2025

For citing

Giliarova A. A. Economic and environmental effects of digital technologies at the Arctic mining enterprises. Arctic: Ecology and Economics, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 83—94. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-83-94. (In Russian).

Abstract

The article analyzes the theoretical foundations for assessing the economic and environmental effects of digital technologies at the mining enterprises. Considering the widespread introduction of digital technologies into operational and business processes of mining in Arctic conditions, it becomes necessary to assess their economic and environmental effectiveness. The article main objective is to analyze the economic and environmental effects of digital technologies at the Arctic mining enterprises and to develop methodological approaches for their evaluation. The research focuses on the technical and economic performance of mining enterprises, considering environmental protection measures, particularly emphasizing the increase in profitability and reduction of costs due to digital technologies. For this purpose, the article adapts and develops five evaluation methods: expert assessment, cost accounting, comparative analysis of income and profit, benchmarking, and cash flow calculation taking into account the time factor. Each method enables obtaining a quantitative and qualitative assessment of the effectiveness of digital technologies. In addition, the author proposes a methodological approach to the integrated application of these methods, adapted to the unique Arctic conditions of mining enterprises. The innovative aspect of this research is the ability to identify not only direct but also indirect economic and environmental benefits from the implementation of digital technologies. These methods have been tested at mining enterprises in the Kola region, which confirmed their applicability and prospects. The conclusions underline the importance of adapting such methods for assessing the economic and environmental effects of using digital technologies at the Arctic mining enterprises. In the future, researchers plan to develop and practically apply these methodological approaches largely at the Arctic mining enterprises.

Keywords: Arctic, mining enterprises, digital technologies, economic and environmental effects, assessment methods.

Funding

The research was carried out within the framework of the FMEZ-2025-0050 research topic “Development of a methodology for the complex solution of mining technology problems in the digital space entity of a mining enterprise”.

Information about the author

Giliarova, Asia Anatol'evna, PhD of Economy, Researcher, Mining Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Science (24, Fersman St., Apatity, Russia, 184200), e-mail: a.gilyarova@ksc.ru.

© Giliarova A. A., 2025