

Применение принципов экономики замкнутого цикла в управлении отходами горнодобывающей промышленности

Иванов С. В.

Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина
ФИЦ Кольский НЦ РАН,
г. Апатиты
s.ivanov@ksc.ru

Аннотация

Горнодобывающая промышленность играет ведущую роль в глобальном экономическом развитии, и ожидается, что спрос на минеральные ресурсы в обозримом будущем будет расти. Объемы образующихся отходов горнодобывающей промышленности настолько велики, что перспектива их преобразования в ценные продукты представляет собой сложную задачу. Эти тенденции создают различные проблемы, поскольку запасы природных ресурсов ограничены, а традиционные методы добычи и переработки минералов связаны со значительным воздействием на окружающую среду. В последнее время в качестве модели для решения этой задачи рассматривается концепция экономики замкнутого цикла. Установлено, что наиболее значительные потоки материалов и воздействие на окружающую среду происходят вблизи мест производства. Кроме того, горнодобывающая промышленность консервативно относится ко внедрению новых технологий или стратегий переработки, что является еще одним препятствием для реализации экономики замкнутого цикла. В связи с этим цифровизация может быть полезной при определении наиболее перспективных областей для переработки и способствовать циркулярности и отслеживаемости материалов, основанных на отходах. Практика экономики замкнутого цикла может значительно сократить загрязнение окружающей среды, уменьшить объемы образования отходов, сохранить природные ресурсы и способствовать социально-экономическому развитию.

Ключевые слова:

горнодобывающая промышленность, экономика замкнутого цикла, промышленные отходы, окружающая среда

Введение

Добыча полезных ископаемых является важной составляющей экономического развития, а извлекаемые ценные компоненты, например металлы, играют важную роль для перехода к «зеленым» технологиям. Однако это также приводит к ежегодному образованию миллионов тонн различных твердых отходов, а также сточных вод.

Application of circular economy principles for mining waste management

Ivanov S. V.

Luzin Institute for Economic Studies,
Apatity
s.ivanov@ksc.ru

Abstract

The mining industry plays a leading role in global economic development, and demand for mineral resources is expected to grow in the foreseeable future. The volumes of waste generated by mining are so large that converting it into valuable products presents a real problem. The situation is difficult because natural resources are limited and traditional methods of extracting and processing minerals have significant environmental impacts. Recently, the concept of a circular economy has been explored as a model for addressing this challenge. The most significant material flows and environmental impacts occur near production sites. Furthermore, the mining industry is conservative in adopting new technologies or recycling strategies, which is another obstacle to a circular economy. In this regard, digitalisation can identify the most promising areas for recycling and promote the circularity and traceability of waste-based materials. The practice of the circular economy can considerably reduce environmental pollution, decrease waste volumes, preserve natural resources and promote socio-economic development.

Keywords:

mining industry, circular economy, industrial waste, environment

Наибольшие потоки отходов в горнодобывающей промышленности составляют отходы обогащения, которые оказывают долгосрочное воздействие на окружающую природную среду [1, 2].

В условиях растущих экологических проблем и истощения ресурсов назрела острая необходимость переос-

мысления традиционных стратегий управления отходами. По мере усиления деградации окружающей среды и роста дефицита ресурсов переход от линейных моделей к циркулярным становится все более актуальным. Традиционная горнодобывающая промышленность основана на процессах начиная с разведки и эксплуатации минеральных ресурсов и до потребления продукции и утилизации отходов. Экономика замкнутого цикла в горнодобывающей промышленности опирается на экологию, системность и теорию устойчивого развития. В основе экономики замкнутого цикла лежат высокоэффективная эксплуатация и комплексное использование минеральных ресурсов. Она представляет собой замкнутый цикл материальных потоков как «минеральные ресурсы – минеральная продукция – возобновляемые минеральные ресурсы». При этом материальный поток перекрывается с потоками энергии и информации, что приводит к гармоничному развитию глобальной окружающей среды и социальному прогрессу. Технологической поддержкой для ее реализации выступают экологически чистые технологии, которые характеризуются меньшими выбросами загрязняющих веществ, рациональным использованием ресурсов и энергии, переработкой большого количества отходов и продукции, а также использованием экологически приемлемых способов утилизации отходов. Сюда включены технологии чистого производства, комплексного использования отходов, снижения загрязнения и т. д. В связи с этим экономика замкнутого цикла стала перспективной концепцией, ее принципы могут изменить систему управления отходами, с акцентом на повторное использование, переработку, эффективность и устойчивость [3].

В рамках концепции экономики замкнутого цикла отходы рассматриваются не только как экологическая проблема или бесполезные материалы, а как потенциально ценные источники сырья. Они содержат металлы и основные минералы, которые можно перерабатывать и использовать для производства ценных материалов и продуктов, например керамики. Отходы могут использоваться в первоначальном виде без переработки или учета ценности, как правило, в непосредственной близости от места добычи в крупных масштабах. Например, при смешивании богатых песком отходов обогащения с цементом для использования в качестве засыпки в подземных шахтах. Аналогичным образом сточные воды традиционно считались не имеющими ценности, однако сокращение потребления воды и замыкание циклов с ее использованием в горнодобывающей промышленности имеют решающее значение для достижения целей устойчивого развития. При переработке воды уменьшаются объем водозабора и выброс загрязняющих веществ в окружающую среду. Кроме того, сама вода уже имеет ценность, а из сточных вод также можно извлекать металлы и химические вещества [4, 5].

Для того чтобы руда не считалась отходами, в ней должна быть определенная концентрация ценных компонентов. Их содержание составляет максимум несколько процентов, что приводит к образованию большого количества отходов. Кроме того, такая концентрация не имеет четкого определения и может меняться в зависимости от

экономических условий, стратегии компании и технологических возможностей. В этом случае необходима минимизация потерь минералов на всех этапах, благодаря чему снижается количество используемого материала и, следовательно, образование отходов [6].

В связи с тем, что за последние десятилетия разрабатывались наиболее ценные месторождения, содержание металлов в извлеченных рудах снизилось, и в будущем ожидается еще большее образование отходов. Практика экономики замкнутого цикла может значительно сократить загрязнение окружающей среды, уменьшить объемы образования отходов, сохранить природные ресурсы и способствовать социально-экономическому развитию. Однако хотя переработка отходов потенциально может снизить воздействие на окружающую среду, в том числе сократить количество их образования, она также способна создать новые экологические проблемы. Для снижения рисков отходы, которые нельзя повторно использовать или переработать, необходимо складировать таким образом, чтобы обеспечить их использование в будущем [7].

Экономика замкнутого цикла и институциональные рамки в горнодобывающей промышленности

В экономике замкнутого цикла отходы превращаются в ценные материалы. Эта ценность создается благодаря их повторному использованию и переработке, а также путем замены невозобновляемых продуктов услугами и возобновляемыми продуктами. Помимо снижения загрязнения, экономика замкнутого цикла позволяет восстанавливать ранее нанесенный ущерб с помощью более совершенных систем. Кроме того, она часто рассматривается как замыкание материальных циклов, способствующее повышению эффективности использования первичных материалов и увеличению срока службы продуктов [8–10].

В горнодобывающей промышленности существуют различные способы внедрения принципов экономики замкнутого цикла начиная с уровня компании, где материалы могут быть возвращены в производственный процесс или использованы в различных целях, и заканчивая системным уровнем, где другие компании и отрасли могут использовать побочные продукты производства. Однако в настоящее время в этой отрасли прилагаются недостаточные усилия в этом направлении, несмотря на существенный экономический потенциал превращения отходов в полезные материалы. Объемы образующихся отходов горнодобывающих компаний настолько значительны, что их невозможно в полной мере использовать для реализации этих подходов. Кроме того, удаленное расположение горнодобывающих предприятий, логистические затраты, воздействие на окружающую среду, неэффективные технические решения и особенности экономических, законодательных и нормативных условий являются существенными препятствиями для расширения масштабов использования отходов [8, 11–13].

Переход от линейной экономики к экономике замкнутого цикла – это технический процесс, в котором различные институты оказывают влияние на поведение компаний. Экономика замкнутого цикла рассматривается как инсти-

тут, поскольку она функционирует в тех же рамках существующих правил и норм. Однако на данный момент институциональная среда следует линейной модели экономики и не нацелена на подходы экономики замкнутого цикла помимо переработки отходов. Это делает переход к модели экономики замкнутого цикла сложной задачей [14, 15].

Такие институты, как общество, международные сети, государство и корпорации стимулируют переход к экономике замкнутого цикла. Самыми важными факторами перехода в глобальном масштабе являются социальные, регуляторные и институциональные, включая поддержку НИОКР. Например, международный совет по горнодобывающей промышленности и металлам разработал десять принципов устойчивого развития, которые поддерживают экономику замкнутого цикла и решают различные проблемы устойчивого развития в этом секторе. Всемирный деловой совет разрабатывает программы по устойчивому развитию, включающие стратегии, совместимые с экономикой замкнутого цикла. Организация Объединенных Наций установила цели устойчивого развития, для их достижения обществу необходимо развитие горнодобывающей промышленности, которая, в свою очередь, может внести свой вклад, например, снизив образование отходов и переработку воды. Кроме того, в рамках борьбы с изменением климата потребуется извлечение большего количества металлов для обеспечения электрификации транспорта [16, 17].

Институциональные стимулы, включая регулирование, могут облегчить переход к экономике замкнутого цикла. Однако, несмотря на попытки институтов стимулировать использование соответствующих решений, иногда политика и неопределенные или сложные правила создают различные препятствия. В связи с этим возможности повторного использования отходов горнодобывающей промышленности зависят от экологических условий, экономических инструментов и политики конкретной страны. Несмотря на то, что в применении принципов экономики замкнутого цикла регулирование играет важную роль, это не обязательно приводит к фактической ее реализации. На данный момент практики экономики замкнутого цикла применяются в отношении переработки отходов и воды, однако о масштабном внедрении этих принципов речи пока не идет. Поскольку созданию благоприятной среды для экономики замкнутого цикла могут препятствовать эти и другие барьеры, для ее реализации необходим целостный подход [18, 19].

Помимо регулирования, институты могут использовать решения в области устойчивого налогообложения, такие как снижение налога на добавленную стоимость. Потенциал таких решений может зависеть от географического региона из-за различий в налогообложении захоронения отходов и их категории. Налог на захоронение отходов обычно выше для опасных отходов, но в некоторых странах налогообложение опасных отходов обходится дешевле, а переработка опасных материалов в неопасные может фактически увеличить налоговые издержки. В некоторых европейских странах отработанная порода и отходы обогащения освобождены от налога на захоронение, поскольку

ку возможности альтернативных методов управления большими объемами отходов ограничены [20, 21].

Горнодобывающие компании реализуют собственные инициативы в области устойчивой добычи полезных ископаемых. В рамках этой концепции помимо снижения воздействия горных работ на окружающую среду также учитывается весь жизненный цикл добываемого материала. Первые из этих инициатив носили глобальный характер, за которыми последовала рекомендация по внедрению передовых практик на местном уровне. Глобальными примерами являются десять принципов устойчивого развития Международного совета по горнодобывающей промышленности и металлам, документ ЮНЕП «Управление минеральными ресурсами в XXI веке», ориентирующий добывающие отрасли на устойчивое развитие, и Международный кодекс управления цианидами, разработанный в целях совершенствования методов работы для защиты водных ресурсов. Однако вследствие неустойчивого роста спроса на материалы и отсутствия учета социальных последствий экономика замкнутого цикла в контексте горнодобывающей промышленности подвергается критике. Кроме того, в широком обсуждении экономики замкнутого цикла горнодобывающему сектору уделяется недостаточное внимание [13, 22].

Успешный переход к модели экономики замкнутого цикла в горнодобывающей промышленности зависит от глобальных законодательных изменений, которые поддерживают переработку ресурсов, эффективное управление отходами и восстановление земель. Для этого необходимы строгие и четкие законодательные рамки и развитие межотраслевого симбиоза для снижения зависимости от первичных минералов. В этом случае компании могут создавать партнерства для обмена и совместного использования материалов, воды, энергии и побочных продуктов. Это может быть значительно более эффективным путем создания внешних институтов для объединения различных игроков. Экономические стимулы, включая налоговые льготы и субсидии, также могут дополнительно мотивировать предприятия к внедрению методов и технологий экономики замкнутого цикла. Однако высокие первоначальные капиталовложения являются существенным препятствием, требуя инвестиций в исследования. Кроме того, несмотря на имеющиеся возможности, компании сосредотачивают небольшие усилия лишь на переработке и повторном использовании отходов [22–24].

Управление отходами горнодобывающей промышленности в рамках экономики замкнутого цикла

Для определения того, что из добытого материала должно быть отправлено на переработку, а что – в отходы, используются специализированные инструменты, которые позволяют лучше и детальнее понять характеристики руды и оптимизировать ее переработку. Минералогический состав рудного тела играет важную роль в характеристиках отходов, поскольку, например, отходы обогащения образуются в результате отделения необходимых ценных компонентов от пустой породы. Они могут содержать различные минералы, являясь основными компонентами пустой

породы, либо в качестве остатков переработки минералов из-за неэффективности технологии. Тем не менее отходы все еще могут обладать потенциалом для извлечения ценных компонентов, несмотря на то, что их концентрация, как правило, ниже, чем в концентратах или рудах [25].

Большинство возможных процессов обработки отходов обогащения технически осуществимы, поскольку они уже были протестированы при работе с различными рудами. Такие процессы основаны на уже опробованных технологиях и после адаптации к более сложному элементному составу могут быть внедрены в производство. Кроме того, сортировка руды может использоваться перед дальнейшими этапами переработки, поскольку она позволяет удалить материалы, содержащие полезный компонент ниже порогового значения, а также снизить энергозатраты и образование отходов. Однако извлечение ценных компонентов из отходов обогащения – это не только вопрос, связанный с технологическим процессом, но и сильно зависящий от мировых рынков руды и химических веществ [26].

Одной из главных проблем при переработке отходов обогащения является неэффективность использования энергии. В настоящее время до 99 % энергии в этом процессе расходуется на измельчение пустой породы, а не на извлечение ценных минералов. Эта неэффективность обусловлена тем, что переработка отходов обогащения – это относительно малоизученная технология, находящаяся еще на начальной стадии развития. Внедрение технологии переработки в настоящее время затруднено необходимостью тщательной оценки ее рентабельности, ценности и практической полезности, перед вложением значительных средств. Энергоэффективность технологии в настоящее время недостаточна и ее внедрение идет медленно, поэтому стороны ожидают повышения эффективности и более четкого финансового обоснования, что делает ее менее привлекательным вариантом для инвестиций [26].

Экономическая выгода от проекта по переработке отходов обогащения может быть увеличена, если помимо целевых металлов извлекаются побочные продукты. Из-за большого разнообразия отходов обогащения, включая различные минералы, металлы или примеси, а также в зависимости от размера частиц, содержания воды и наличия технологических химикатов каждый процесс извлечения должен быть адаптирован к специфическим характеристикам конкретного участка добычи. Однако на каждом участке используются свои методы добычи и переработки минералов, а также различается состав добываемой руды. Это требует создания инструментов и методов контроля указанного разнообразия характеристик в процессах разработки материалов и продукции. Таким образом, для создания жизнеспособного технологического маршрута может потребоваться объединение множества процессов, формирование которых подразумевает понимание всех возможных способов и их эффективного использования [27].

Отходы горнодобывающей промышленности могут быть модифицированы для использования в продуктах высокой ценности. Например, путем переработки во вторичное сырье для строительной промышленности в каче-

стве заменителей цемента в бетоне. К настоящему времени лишь ограниченное количество исследований посвящено использованию отходов горнодобывающей промышленности в этом качестве, в частности, из-за несовместимости их химического состава с общепринятыми стандартами цемента. Использование отходов в качестве цементирующих добавок возможно, при этом химическая или физическая обработка может улучшить этот потенциал, однако требуются дальнейшие исследования механических свойств бетона [12].

Геополимеризация изучается в ряде публикаций как технология переработки отходов в кирпичи с последующим использованием в строительстве. Кроме того, такие отходы могут быть повторно использованы в качестве мелкого заполнителя в бетоне для замены природного песка. При переработке с понижением объема отходы используются в первоначальном виде и могут применяться в качестве засыпного материала при строительстве дорог или креплении плотин. В этом случае отходы используются на месте добычи или в непосредственной близости от него [28].

Благодаря совместному воздействию технических, социальных, законодательных и экономических факторов, за последние десятилетия наблюдается сближение процессов производства металлов и переработки минеральных отходов. В связи с этим существуют возможности интеграции вторичного сырья или промежуточных продуктов в первичное производство. Это позволит повысить ценность ранее неиспользованных фракций, эффективнее использовать инфраструктуру и обеспечить синергию в поиске материалов и извлечении ресурсов. Однако найти подходящее применение для всех отходов горнодобывающей промышленности является сложной задачей, поскольку их объемы очень велики. Если им не находится должного применения, их следует безопасно захоронить, учитывая возможности использования в будущем. Возможность утилизации отходов необходимо учитывать уже на этапе планирования разработки участка, поскольку этот метод определяет, возможно ли дальнейшее использование отходов или материал становится непригодным. Важным фактором является, был ли уже засыпан отвал хвостохранилища и существует ли на территории рудника инфраструктура, позволяющая упростить переработку отходов. Кроме того, участки добычи могут быть перепрофилированы в туристические достопримечательности, научно-образовательные центры или использоваться в качестве систем хранения энергии. В связи с этим поиск оптимальных решений для создания ценности для отходов горнодобывающей промышленности можно рассматривать как сочетание различных стратегий экономики замкнутого цикла [8, 16].

Использование цифровых технологий в сфере обращения с отходами

В горнодобывающей промышленности предотвращение образования отходов включает в себя сокращение объемов производства, достигаемое за счет уменьшения затрат, например, посредством целенаправленной выемки

или оптимизации переработки минералов. Цифровые технологии могут способствовать развитию альтернативных способов преобразования отходов, а также поддерживать генерацию данных для их утилизации и использования, что уменьшит то их количество, которое подлежит захоронению. В связи с этим сокращение и переработка отходов горнодобывающей промышленности могут быть дополнены технологиями мониторинга процессов и обнаружения материалов.

Обсуждение экономики замкнутого цикла объединяет процессы потока данных и стратегии в целях минимизации отходов. Процессы потока данных включают в себя сбор, интеграцию, анализ данных и обмен ими. Последний этап определяется как наиболее важный при структурировании и группировке цифровых технологий для решений в области экономики замкнутого цикла. Связь между процессами потока данных и стратегиями включает решения, охватывающие промышленный симбиоз для восстановления, сокращения и предотвращения материальных потерь. Реализация этих стратегий и то, насколько грамотно данные могут быть представлены или сгенерированы в знания, может варьировать от описательного сбора данных до прогнозной их аналитики. Цифровые решения, поддерживающие процессы потока данных, могут продвигать подход к экономике замкнутого цикла и снижать воздействие на окружающую среду и социальную сферу [29].

Цифровизация содействует развитию экономики замкнутого цикла несколькими способами, позволяя осуществлять мониторинг и предоставлять данные о наличии, местоположении, количестве и качестве материалов, а также эффективнее управлять процессами. Искусственный интеллект, машинное обучение, виртуальная и дополненная реальность, автоматизация и автономное проектирование, интернет вещей, цифровая инфраструктура и безопасность данных являются основными факторами, способствующими цифровой трансформации сектора сырьевых материалов и оптимизации процессов [там же].

Цифровые технологии, многие из которых уже используются для управления отходами, можно разделить на три уровня применения: процессы, продукты и платформы. Сбор, управление и анализ данных о процессах и продуктах связаны, например, с химическим составом, а также физическими и химическими свойствами веществ и материалов. Стратегии сокращения и переработки отходов горнодобывающей промышленности могут поддерживаться технологиями мониторинга процессов и сортировки руды, такими как спектроскопия, машинное зрение, анализ изображений или распознавание образов. Платформы связывают потребителей и производителей, позволяют развивать услуги и промышленный симбиоз. Вместо традиционных способов предлагаются цифровые инструменты планирования и управления закрытием участков добычи, которые должны охватывать аспекты, связанные с управлением и обработкой отходов, пустой породы и воды.

Цифровые решения, поддерживающие процессы потока данных и реализации стратегий, влияют на то, насколько грамотно данные могут быть представлены или сгене-

рированы в знания и могут варьировать от описательного сбора данных до прогнозной аналитики. Цифровизация и создание базы данных о свойствах и ценах вторичных материалов могут оказать существенное влияние на цепочку создания стоимости и обеспечение цикличности сырья. Однако могут существовать препятствия для обмена данными, связанными с отходами, из-за защиты этой информации компаниями [30].

Существуют концепции паспортов материалов и продукции, которые представляют собой цифровые представления физических веществ, материалов или продуктов на протяжении всей цепочки создания стоимости. Однако потенциал данных, генерируемых с помощью развивающихся цифровых технологий для поддержки использования отходов горнодобывающей промышленности, заслуживает оценки.

Заключение

Отходы горнодобывающей промышленности содержат ценные компоненты и имеют потенциал экономической ценности. Они могут быть преобразованы в ценные продукты различными способами, однако объем их переработки должен быть достаточно большим, чтобы покрыть затраты. Экономическая целесообразность использования отходов зависит от ряда параметров, таких как количество и цена целевых металлов, налогообложение и нормативные акты, которые могут меняться со временем. Кроме того, для определения возможности их использования, необходима информация о существующей инфраструктуре. В настоящее время уже существуют технологии для извлечения металлов из отходов обогащения и использования минеральных остатков для создания продуктов высокой или низкой стоимости. Отработанные участки добычи могут использоваться для совершенно новых целей, таких как туризм и хранение энергии.

Поскольку содержание руды снижается, а спрос на металлы значительно растет, это приводит к образованию новых типов отходов обогащения и ожидается, что их объем увеличится в ближайшие десятилетия. Эти объемы значительны, поэтому полное их использование в соответствии с принципами экономики замкнутого цикла представляет собой сложную задачу. Это означает, что для управления отходами требуется комбинация различных подходов экономики замкнутого цикла.

Согласно концепции экономики замкнутого цикла, ценность должна быть максимальной. Как правило, стратегии управления отходами обогащения были сосредоточены на вторичном использовании с понижением ценности, однако существуют возможности преобразования отходов в продукты с более высокой добавленной стоимостью. Различные технологии использования отходов уже разработаны и протестированы, но многие из них все еще находятся на некоммерческой стадии, а отдельные подходы к исследованию извлечения металлов или использования минералов могут быть экономически нецелесообразны. Однако чтобы инвестиционное решение оказалось положительным, необходимы комплексное использование отходов

обогащения, учитывающее все аспекты, а также развивать подходящие экосистемы и партнерства.

Цифровизация может способствовать повышению эффективности процессов управления отходами и материалами. Для этого могут быть использованы мониторинг и анализ данных, а также сведения о местоположении, количестве, качестве и времени потока материалов и отходов, позволяющие прогнозировать динамику цепочки создания стоимости. Кроме того, потенциал использования отходов в качестве ресурсов может быть раскрыт благодаря выявлению и изучению новых вариантов на цифровых платформах для вторичного сырья. Существуют препятствия для обмена данными, обусловленные как критической важностью данных для бизнеса, так и их конфиденциальностью, в частности данные об отходах. Поэтому цифровые инструменты, например для закрытия участков добычи, должны учитывать именно эти аспекты. Кроме того, концепции цифровых паспортов материалов и продукции потенциально могут повысить циркулярность и отслеживаемость отходов, а также способствовать их безопасному использованию.

Экономика замкнутого цикла в сфере управления отходами имеет ряд положительных эффектов. Акцент на непрерывной переработке и повторном использовании материалов ограничивает загрязнение окружающей среды, сохраняет природные ресурсы и снижает зависимость от свалок. Кроме того, она создает рабочие места в экологически чистых отраслях и является экономически выгодной как для потребителей, так и для производителей во всем мире.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература / References

1. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches / M. Edraki, T. Baumgartl, E. Manlapig [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – Vol. 84. – P. 411–420.
2. Current state of fine mineral tailings treatment: a critical review on theory and practice / C. Wang, D. Harbottle, Q. Liu, Z. Xu // *Minerals Engineering*. – 2014. – Vol. 58. – P. 113–131.
3. Simate, G. S. Acid mine drainage: challenges and opportunities / G. S. Simate, S. Ndlovu // *International Journal of Engineering Research in Africa*. – 2014. – Vol. 2. – P. 1785–1803.
4. Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – a review / P. Kinnunen, A. Ismailov, S. Solismaa [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 174. – P. 634–649.
5. Valorization of Finnish mining tailings for use in the ceramics industry / S. Solismaa, A. Ismailov, M. Karhu [et al.] // *Bulletin of the Geological Society of Finland*. – 2018. – Vol. 90. – P. 33–54.
6. Reprocessing of mining waste: Combining environmental management and metal recovery? / G. Bellenfant, A. G. Guezennec, F. Bodenan [et al.] // *Mine Closure*. – 2013. – P. 571–582.
7. West, J. Decreasing metal ore grades. Are they really being driven by the depletion of high-grade deposits? / J. West // *Journal of Industrial Ecology*. – 2011. – Vol. 15 (2). – P. 165–168.
8. Lebre, E. Sustainable practices in the management of mining waste: a focus on the mineral resource / E. Lebre, G. Corder, A. Golev // *Minerals Engineering*. – 2017. – Vol. 107. – P. 34–42.
9. Ivanov, S. V. Upravlenie othodami gornodobyvayushih predpriyatii kak element ustoichivoi dobychi poleznykh islopaemykh [Waste management of mining enterprises as an element of sustainable mining] / S. V. Ivanov // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Economic Sciences"*. – 2025. – № 5 (81). – P. 74–81.
10. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes / Z. Bian, X. Miao, S. Lei [et al.] // *Science*. – 2012. – Vol. 337 (6095). – P. 702–703.
11. Stal, H. I. A decoupling perspective on circular business model implementation: illustrations from Swedish apparel / H. I. Stal, H. Corvellec // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 171. – P. 630–643.
12. Lebre, E. The role of the mining industry in a circular economy. A framework for resource management at the mine site level / E. Lebre, G. Corder, A. Golev // *Journal of Industrial Ecology*. – 2017. – Vol. 21 (3). – P. 662–672.
13. Coming full circle: Why social and institutional dimensions matter for the circular economy / V. Moreau, M. Sahakian, P. van Griethuysen, F. Vuille // *Journal of Industrial Ecology*. – 2017. – Vol. 21 (3). – P. 497–506.
14. Product design and business model strategies for a circular economy / N. M. P. Bocken, I. de Pauw, C. Bakker, B. van der Grinten // *Journal of Industrial and Production Engineering*. – 2016. – Vol. 33 (5). – P. 308–320.
15. Lottermoser, B. G. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes / B. G. Lottermoser // *Elements*. – 2011. – Vol. 7. – P. 405–410.
16. Discussion on the model of mining circular economy / Y. Zhao, L. Zang, Z. Li, J. Qin // *Energy Proceedings*. – 2012. – Vol. 16. – P. 438–443.
17. Scott, W. R. Approaching adulthood: the maturing of institutional theory / W. R. Scott // *Theory and Society*. – 2008. – Vol. 37. – P. 427–442.
18. Gifford, B. Building local legitimacy into corporate social responsibility: gold mining firms in developing nations / B. Gifford, A. Kestler, S. Anand // *Journal of World Business*. – 2010. – Vol. 45. – P. 304–311.
19. Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy: a crossregional comparison of China, the US, and Europe / V. Ranta, L. Aarikka-Stenroos, P. Ritala, S. J. Makinen // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2018. – Vol. 135. – P. 70–82.
20. Иванов, С. В. Управление горнопромышленными отходами арктических промышленных предприятий: охрана окружающей среды и экономика производ-

- ства / С. В. Иванов, В. А. Цукерман // Арктика и Север. – 2024. – № 55. – С. 40–53.
- Ivanov, S. V. Upravlenie gornopromyshlennymi othodami arkticheskikh promyshlennykh predpriyatii: ohrana okruzhayushei sredy i ekonomika proizvodstva [Mining waste management of Arctic industrial enterprises: environmental protection and production economics] / S. V. Ivanov, V. A. Tsukerman // Арктика и Север [Arctic and the North]. – 2024. – № 55. – P. 40–53.
21. Barriers to the circular economy: evidence from the European Union (EU) / J. Kirchherr, L. Piscicelli, R. Boura [et al.] // Ecological Economics. – 2018. – Vol. 150. – P. 264–272.
 22. Dashwood, H. S. Sustainable development and industry self-regulation: developments in the global mining sector / H. S. Dashwood // Business & Society. – 2014. – Vol. 53 (4). – P. 551–582.
 23. de Villiers, C. The institutionalization of mining company sustainability disclosures / C. de Villiers, M. Low, G. Samkin // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 84. – P. 51–58.
 24. Industrial symbiosis in the Australian minerals industry. The cases of Kwinana and Gladstone / D. van Beers, G. Corder, A. Bossilkov, R. van Berkel // Journal of Industrial Ecology. – 2007. – Vol. 11 (1). – P. 55–72.
 25. Bridging the gap: understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit / J. Lessard, W. Sweetser, K. Bartram [et al.] // Minerals Engineering. – 2016. – Vol. 91. – P. 92–99.
 26. Falagan, C. New approaches for extracting and recovering metals from tailings / C. Falagan, B. M. Grail, D. B. Johnson // Minerals Engineering – 2017. – Vol. 106. – P. 71–78.
 27. Tsukerman, V. A. Environmental policy of resource corporations in commercial mineral production in the Arctic Zone of Russia / V. A. Tsukerman, S. V. Ivanov // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2020. – № 10. – P. 56–66.
 28. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics / A. M. T. Simonsen, S. Solismaa, H. K. Hansen, P. E. Jensen // Waste Management – 2020. – Vol. 102. – P. 710–721.
 29. Pagoropoulos, A. The emergent role of digital technologies in the circular economy: a review / A. Pagoropoulos, D. C. A. Pigosso, T. C. Mcaloone // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 64. – P. 19–24.
 30. Antikainen, M. Digitalisation as an enabler of circular economy / M. Antikainen, T. Uusitalo, P. Kivikyto-Reponen // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 73. – P. 45–49.

Благодарность (госзадание)

Статья подготовлена в рамках темы НИР FMEZ-2026-0035 «Разработка научных основ устойчивого и инновационно-ориентированного развития природоэксплуатирующих промышленных систем Арктики в условиях трансформации сырьевых и энергетических рынков и экологических изменений».

Acknowledgements (state task)

The article was prepared in frames of the research topic FMEZ-2026-0035 “Razrabotka nauchnykh osnov ustoychivogo i innovatsionno-orientirovannogo razvitiya prirodoeksploatiruyushchih promyshlennykh sistem Arktiki v usloviyakh transformatsii syryevykh i energeticheskikh rynkov i ekologicheskikh izmeneniy [Development of scientific foundations for sustainable and innovation-oriented development of nature-based industrial systems in the Arctic in the context of transformation of raw materials and energy markets and environmental changes]”.

Информация об авторе:

Иванов Станислав Викторович – научный сотрудник Института экономических проблем им. Г. П. Лузина ФИЦ Кольский научный центр Российской академии наук; Scopus 57194024976; <https://orcid.org/0000-0001-9141-3211>, SPIN-код: 8610-1563 (184209, Российская Федерация, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24а; e-mail: s.ivanov@ksc.ru).

About the author:

Stanislav V. Ivanov – Researcher, Luzin Institute for Economic Studies; Scopus Author ID: 57194024976; <https://orcid.org/0000-0001-9141-3211>, SPIN-code: 8610-1563 (24a Fersman st., Apatity, Murmansk Region, 184209, Russian Federation; e-mail: s.ivanov@ksc.ru).

Для цитирования:

Иванов, С. В. Применение принципов экономики замкнутого цикла в управлении отходами горнодобывающей промышленности / С. В. Иванов // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экономические науки». – 2026. – № 5 (90). – С. 99–106.

For citation:

Ivanov, S. V. Primenenie principov ekonomiki zamknutogo cikla v upravlenii othodami gornodobyvayushchej promyshlennosti [Application of circular economy principles for mining waste management] / S. V. Ivanov // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Economic Sciences”. – 2026. – № 5 (90). – P. 99–106.

Дата поступления рукописи: 06.04.2026

Прошла рецензирование: 15.05.2026

Принято решение о публикации: 09.06.2026

Received: 06.04.2026

Reviewed: 15.05.2026

Accepted: 09.06.2026