

Модели циркулярной экономики в промышленности: разработка концептуальных основ

О.А. МАРИНИНА ✉, Н.Ю. КИРСАНОВА, М.А. НЕВСКАЯ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
✉ marinina_oa@pers.spmi.ru; ☎ +7-911-295-96-67

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Marinina, O.; Kirsanova, N.; Nevskaya, M. Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework. *Energies* 2022, 15, 9376. <https://doi.org/10.3390/en15249376>

Аннотация: Одной из тенденций устойчивого экономического развития является переход к циркулярным бизнес-моделям, которые направлены на оптимизацию товарных и материальных потоков за счет учета их цикличности на всех этапах производства. Адаптация циркулярных бизнес-моделей к горно-обогатительным производствам может послужить для горнодобывающих компаний стимулом к модернизации и переходу на новый уровень технологического развития. В данной статье предпринята попытка разработать концептуализацию моделей циркулярного бизнеса, учитывающую характер производственных цепочек в угледобыче, энергетике и металлургии для снижения производственных затрат, расширения ассортимента продукции, улучшения показателей устойчивого развития и роста стоимости компании. Статья основана на результатах предварительных исследований, направленных на анализ эффективности циркулярных моделей, систематизацию данных об опыте рационального использования ресурсов в горнодобывающей отрасли и трансформацию базовых циркулярных моделей в адаптированные к условиям работы угольных компаний. В данном исследовании на основе междисциплинарного подхода и с учетом специфики угольных компаний, а также принципа ценности ресурса на протяжении всего его жизненного цикла разработана концептуальная схема вариантов реализации и оценки циркулярных бизнес-моделей. Предложенная концептуальная схема моделей циркулярного бизнеса может быть использована российскими угольными компаниями при разработке корпоративных стратегий и долгосрочных планов развития.

Ключевые слова: угольные компании; устойчивое развитие; циркулярная экономика; рациональное использование угля; многоцелевое использование ресурсов; циркулярные бизнес-модели; корпоративные стратегии.

Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework

Oksana A. MARININA ✉, Natalia Yu. KIRSANOVA and Marina A. NEVSKAYA
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
✉ marinina_oa@pers.spmi.ru; ☎ +7-911-295-96-67

Abstract: One of the trends in sustainable economic development is the transition to circular business models, which aim to optimize goods and material flows by taking into account their cyclical nature at all production stages. Adapting circular business models to mining and mineral processing operations can serve as an impetus for mining companies to upgrade and move to a new level of technological sophistication. This article attempts to develop a conceptual framework for circular business models factoring in the nature of production chains in coal mining, power generation, and metal production to reduce production costs, expand the product range, improve sustainable development indicators, and deliver growth in company value. This article is based on desk studies that were aimed at analyzing the efficiency of circular models, organizing data on experience in rational resource use in the mining industry, and transforming basic circular models into adapted ones for the environment in which coal companies operate. This study developed a conceptual framework of options for the implementation and evaluation of circular business models using an interdisciplinary approach and taking into account the specific features of coal companies and the principle of a resource being valuable throughout its whole life cycle. The proposed conceptual framework of circular business models can be used by Russian coal companies to design corporate strategies and long-term development plans.

Keywords: coal companies; circular economy; rational coal use; multipurpose resource use; circular business models; corporate strategies; sustainable development.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2024.

1. Введение

В последние десятилетия угольная отрасль столкнулась с рядом глобальных вызовов, среди которых конкуренция со стороны альтернативных источников энергии (прежде всего газа) и растущее влияние экологических факторов (причисление угля к «грязному топливу»), что определило ход ее дальнейшей истории. Однако, несмотря на все сложности, связанные с экологическими проблемами, социальным влиянием и рынками, потребление угля с 2000 по 2018 год выросло в 1,6 раза на фоне 1,5-кратного роста мирового потребления энергии, что стало самым высоким темпом роста среди первичных источников энергии (рис. 1) [1].

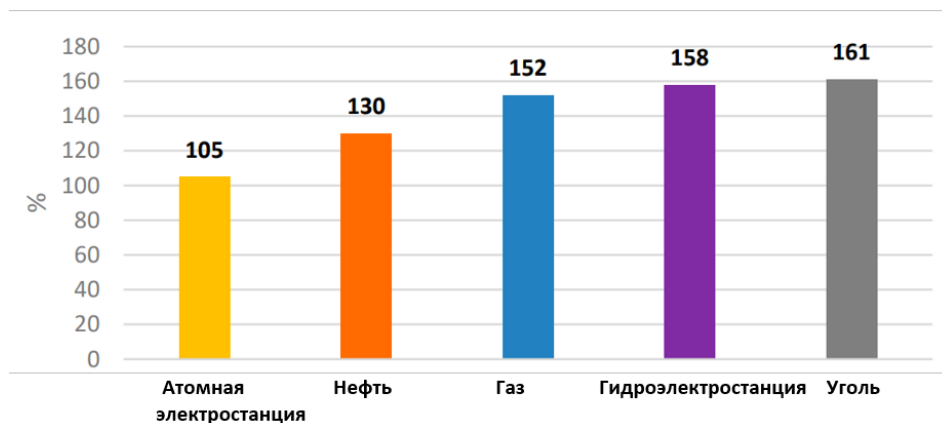


Рис. 1. Рост производства первичной энергии с 2000 по 2018 гг. Адаптировано с разрешения [1]

Согласно долгосрочным микроэкономическим прогнозам, мир не готов отказаться от угля. Несмотря на то что в будущем продажи угля и, как следствие, его добыча будут снижаться, поскольку ряд стран стремится постепенно отказаться от использования угольной энергетики, спрос на уголь в глобальном выражении будет оставаться стабильным. Мировой объем потребления угля в 2021 году составит 8172,6 млн тонн. Многие страны пока не готовы отказаться от него в долгосрочной перспективе [2].

В связи с этим угольная промышленность должна найти свою конкурентную нишу, чтобы соответствовать современным требованиям устойчивого развития и «зеленой» экономики. Это можно сделать за счет улучшения использования угля, максимизации добавленной стоимости за счет глубокой переработки и создания новых видов продукции из угля. Многие современные технологии добычи, обогащения и переработки угля уже способны повысить стоимость продукции за счет рационального и многоцелевого использования ресурсов, то есть с помощью моделей циркулярной экономики. Очевидно, что переход к моделям циркулярного бизнеса позволит горнодобывающим компаниям генерировать социальные, экономические и экологические эффекты за счет создания цепочек добавленной стоимости и повышения качества конечной продукции.

В настоящее время отношение к горнодобывающей промышленности и ее месту в циркулярном экономическом процессе в контексте перехода к «зеленой» энергетике пересматривается. В 2020 году выйдет доклад Всемирного банка «Минералы для климатических действий: минералоемкость перехода к чистой энергетике» [3] определены 17 полезных ископаемых, которые необходимы для перехода от чистой к возобновляемой энергетике (литий, ванадий, алюминий, кобальт, медь, молибден и т. д.) [4]. Кроме того, наметившиеся тенденции роста спроса на металлы сохраняют роль горнодобывающего сектора в экономике развивающихся стран [5], которые являются основными поставщиками металлов, необходимых для создания инфраструктуры низкоуглеродной энергетики в будущем [6], в первую очередь для развитых стран [7].

Таким образом, в западных исследованиях циркулярность в горнодобывающем секторе касается только оборота металлов, необходимых для развития технологий безуглеродной энергетики (ветряная, солнечная генерация и т. д.). При этом вопросы внедрения ДЭ в процессы добычи топливно-энергетических ресурсов практически не освещаются, несмотря на то, что актуальность их использования в энергетическом комплексе развивающихся стран, в том числе и России, очень высока.

Исследование, проведенное Всемирным экономическим форумом (ВЭФ-2015) [8], доказало, что крупномасштабные проекты циркулярной экономики могут существенно изменить баланс между поставками первичных и вторичных сырьевых ресурсов и траектории движения горнодобывающих компаний, включающие диверсификацию продукции. Однако из-за сложного характера производственных структур в минерально-сырьевом секторе и самих продуктов стандартные модели циркулярной экономики не могут быть реализованы горнодобывающими компаниями. Им необходимо учитывать особенности производственного процесса и жизненного цикла продукции в данном секторе. В то же время очевидно, что модели циркулярного бизнеса – это практический способ реализации принципов циркулярной экономики, и их включение в бизнес-процессы горнодобывающих компаний приведет к трансформационному росту, включая диверсификацию, выстраивание производственных цепочек и объединение в производственные кластеры [9]. Это потребует комплексной оценки целесообразности использования моделей циркулярного бизнеса с учетом особенностей горнодобывающей отрасли. Поэтому необходимо разработать методологические основы циркулярности и практические методы внедрения циркулярных моделей, учитывающие характер горнодобывающих компаний.

Этот тезис подтверждается и в исследовании [10], где отмечается: «Полученные результаты, подтверждая, что следование циркулярным схемам может привести к снижению потребления природных ресурсов, также указывают на то, что ЦЭ все еще имеет незначительный эффект в отношении спроса на ресурсы, связанного с экономическим ростом. Другими словами, далеко не факт, что повышение уровня переработки или кругооборота обязательно приведет к сокращению добычи первичных ресурсов, поскольку глобальные тенденции, такие как рост потребления, могут более чем нивелировать преимущества кругооборота. Если не пересмотреть современные модели потребления, то стратегии ЦЭ рискуют остаться техническим инструментом, который не изменит ход нынешнего неустойчивого развития» [10].

Основная проблема заключается в отсутствии теоретических знаний и механизма организации циркулярных бизнес-моделей с учетом отраслевой специфики. Сложный характер производственных структур и специфика продукции предприятий минерально-сырьевого комплекса не позволяют реализовать общепринятые циркулярные модели без учета особенностей организационно-технологических процессов добычи и жизненного цикла продукции горнодобывающей промышленности. В связи с этим необходима разработка методологических основ циркулярности и практических методов реализации циркулярных моделей с учетом специфики горнодобывающих предприятий.

Целью исследования является разработка концептуальных основ вариантов реализации и оценки циркулярных бизнес-моделей на основе междисциплинарного подхода с учетом специфики угольных компаний и принципа ценности ресурса на протяжении всего его жизненного цикла. Задачи исследования следующие:

- Сбор и анализ данных об условиях рационального и многоцелевого использования угля, утилизации угольных отходов и переработки угля на основе опыта, накопленного горнодобывающими компаниями.
- Разработать модели циркулярного бизнеса, адаптированные к условиям угольной отрасли и учитывающие возможность устойчивого развития.

Следует выделить специфику угольных компаний, как объекта циркулярной экономики: истощение ресурсной базы и ухудшение качества минеральных активов; повышенная капиталоемкость производства; специфический предмет труда (продукция добычи), обладающий высокой ликвидностью на рынке и стандартностью как потребительная стоимость; достаточно устойчивые технологические и экономические связи с покупателями и поставщиками в связи с использованием продукции для последующей переработки; высокая степень вертикальной и горизонтальной интеграции; повышенные требования к промышленной и экологической безопасности.

Развитие теории ЦЭ и адаптация циркулярных бизнес-моделей в сфере добычи и переработки минерального сырья может стать драйвером технологического обновления горнодобывающих отраслей. Циркулярные модели, основанные на инновационных производственных процессах, позволят превратить отходы или побочные продукты одной отрасли в ресурсы для другой. На горнодобывающих объектах может быть применен циркулярный подход. Это позволит сократить

количество накопленных отходов в отвалах и снизить темпы накопления текущих отходов. Концептуальная схема вариантов циркулярных бизнес-моделей, учитывающая специфику производственных цепочек угледобывающих, энергетических и угольно-металлургических компаний, позволит снизить себестоимость, увеличить ассортимент продукции, улучшить показатели устойчивости и обеспечить рост стоимости компании.

Научная новизна исследования заключается в разработке механизма внедрения эталонных циркулярных моделей на отраслевом уровне в конкретной бизнес-среде. Следует выделить специфику угольных компаний, как объекта циркулярной экономики: истощение ресурсной базы и ухудшение качества минеральных активов; повышенная капиталоемкость и ресурсоемкость производства; специфический предмет труда (продукция добычи), обладающий высокой ликвидностью на рынке и стандартами как потребительная стоимость; достаточно устойчивые технологические и экономические связи с покупателями и поставщиками в связи с использованием продукции для последующей переработки; высокая степень вертикальной и горизонтальной интеграции; повышенные требования к промышленной и экологической безопасности.

В разделе «Обзор литературы» рассматриваются теоретические основы циркулярной экономики, которые легли в основу данного исследования. В разделе показано развитие теории циркулярной экономики, рассмотрены стандартные бизнес-модели, а также концепции рационального и многоцелевого использования ресурсов как основы циркулярности для горнодобывающих компаний.

В разделе «Материалы и методы» представлена методология исследования, включающая анализ и обработку практического опыта, определение принципов циркулярности и трансформацию стандартных бизнес-моделей в адаптированные. Раздел также включает краткое описание объекта исследования и диаграмму распределения минеральных ресурсов.

Раздел «Результаты» содержит описание кейсов, разделенных на три группы. Эти группы отражают особенности производственного процесса в горнодобывающем секторе и соответствуют принципам стандартных моделей циркулярного бизнеса. Представлена система моделей циркулярного бизнеса, адаптированных к условиям угольной промышленности.

В разделе «Обсуждение» представлен анализ полученных результатов в виде обсуждения условий внедрения моделей в современные организационные структуры угольной отрасли и дана экономическая оценка моделей. Также отмечены ограничения исследования.

2. Обзор литературы

По мере того как мировое сообщество признавало необходимость перехода от традиционной линейной («бери, производи, трать») модели экономики к концепции устойчивого развития, началась смена парадигмы развития социально-экологических и экономических систем. В настоящее время основное внимание уделяется поддержанию баланса между социальными, экологическими и экономическими аспектами путем достижения Целей устойчивого развития (ЦУР), предложенных ООН в 2015 году [11].

Одним из путей достижения этих целей является переход к циркулярной экономике (ЦЭ), основанной на принципе «взять, сделать, повторно использовать». Если традиционная линейная модель экономики имеет конфигурацию открытого цикла, в которой производство конечной продукции связано с большими затратами ресурсов и антропогенной нагрузкой, то модель ЦЭ направлена на имитацию механизмов замкнутой самовосстанавливающейся природной системы, повторное использование продукции и ее переработку в конце жизненного цикла [12].

Реализация принципов ЦЭ предполагает создание замкнутых циклов в производственном секторе. Ресурсы не выходят из таких циклов и/или преобразуются в новые товары. Продление жизненного цикла продукции, характерное для циркулярной экономики, предполагает создание цепочек создания стоимости в процессе производства, потребления и переработки материальных ресурсов и продукции, что в свою очередь создает экономические, социальные и экологические эффекты [12].

Современные исследования в области ЦЭ основаны на теории цикличности производства и потребления. Первоначальный принцип 3R (reduce, reuse, recycle – сокращать, повторно использовать, перерабатывать) [13] трансформировался сначала в 6R («recover, redesign, remanufacture» – восстанавливать, перепроектировать, изготавливать заново – были добавлены для отражения всех этапов жизненного цикла продукта) [14], а затем в 9R («refuse, refurbish, rethink» – отказаться от, переделать, переосмыслить – были добавлены для отражения идеи разумного потребления) [15, 16].

В результате внедрения принципов СЕ изменились тенденции производства и потребления. ЦЭ стало логичным шагом в глобальном устойчивом развитии и прямо или косвенно способствует достижению ЦУР, включая Цель 12 («Обеспечение устойчивых моделей потребления и производства»), Цель 6 («Обеспечение доступа к воде и санитарии для всех»), Цель 7 («Обеспечение доступа к недорогой, надежной, устойчивой и современной энергии») и Цель 8 («Содействие инклюзивному и устойчивому экономическому росту, занятости и достойной работе для всех») [17, 18].

На практике принципы ЦЭ могут быть реализованы с помощью пяти бизнес-моделей: циркулярные поставки, восстановление ресурсов, платформы совместного использования, продление срока службы продукта и продукт как услуга [12,19-21].

1. Циркулярные поставки. В этой модели невозобновляемые ресурсы заменяются возобновляемыми, которые либо полностью перерабатываются, либо подвергаются биологическому разложению. Эта модель наиболее применима в автомобильной и энергетической промышленности. Например, «Новелис» и «Форд Мотор Компани» создали замкнутый цикл переработки алюминия, который позволил сократить выбросы парниковых газов и затраты энергии на переработку алюминия на 95 % [20].

2. Восстановление ресурсов. Новые технологии и инновации позволяют восстанавливать и повторно использовать ресурсы. Благодаря сокращению отходов снижаются потери ресурсов и повышается рентабельность производства. Модель наиболее эффективна в отраслях с широким спектром вторичных товаров и при наличии потенциала для восстановления и переработки отходов. Например, нефтеперерабатывающий завод «ДОНГ Энерджи» и «Статойл» совместно используют свои технологические цепочки, обмениваясь отходами и побочными продуктами [20].

3. Платформы совместного использования. Эта модель основана на обмене и совместном использовании товаров или активов. Она подходит для отраслей с низким уровнем использования продукции и/или недозагруженными производственными мощностями, позволяя производителям воспользоваться преимуществами отложения за счет распределения постоянных затрат. Она может быть реализована не только в сфере производства (бизнес для бизнеса, или B2B), но и в таких моделях, как бизнес для потребителя (B2C) и от потребителя к потребителю (C2C) [19].

4. Продление срока службы продукта. Достигается за счет модернизации и ремонта продукции.

5. Продукт как услуга. Эта модель основана на аренде или лизинге продукции вместо ее покупки.

За последнее десятилетие интерес исследователей к разработке теоретических и практических принципов реализации стратегии ЦЭ значительно возрос. Суть различных моделей циркулярной экономики представлена в работах Фонда Эллен Макартур [22], Макартур Э., Вогрей Д. [23], Хаас В., Краусманн Ф., Виденхофер Д., Хайнц М. [24], Сове С., Бернард С., Слоан П. [25], Бломсма Ф., Бреннан Г., [26], Гайсдорфер, Мартин и Савагет, Пауло и Бокен, Нэнси и Халтинк, Эрик [27], Кирхерр, Й.; Рейке, Д.; Хеккерт, М. [28], Алхавари, Омар и Аван, Усама и Бхутта, М. и Улькю, М. Али. [29], Мочалова Л.А., Соколова О.Г. [30], Бобылев С.Н., Соловьева С.В. [19], Саман Амир [31].

Бломсма Ф. и Бреннан Г. [26] обобщили ряд интерпретаций модели СЕ, наиболее популярной из которых является модель, предложенная Фондом Эллен Макартур. В основе этой модели лежит циркулярный поток экологически чистых материалов и технологий. Биологический цикл направлен на сохранение экосистемы за счет сокращения добычи природных ресурсов, внедрения возобновляемых материалов, повторного использования отходов производства и энергии. Технический цикл основан на замкнутых цепочках поставок, которые продлевают жизненный цикл товаров и материалов, создавая новую добавленную стоимость. Поскольку вторичные ресурсы циркулируют в техническом цикле, это снижает потребление сырья.

Как в моделях, обобщенных в работе Бломсмы Ф. и Бреннана Г., так и в модели, предложенной ERA-MIN 2 [26,32], горнодобывающая промышленность представлена как связь, а не часть модели ЦЭ [3]. Такое упрощение не позволяет в полной мере оценить потенциал первичного звена системы, которым является добыча природных ресурсов, или возможности трансформации в горнодобывающем секторе.

Цель данной статьи – оценить потенциал первичного звена в цепи добычи и потребления ресурсов. По прогнозам Фонда Эллен Макартур, к 2030 году ЦЭ может принести до 4,5 триллиона

долларов США экономических выгод [6]. Сколько из этой суммы приходится на долю горнодобывающей промышленности?

В докладе [33] Бартел Р., Дрюэлл К. и Моррисон Г. доказывают, что, приняв принципы СЕ, горнодобывающие компании смогут сохранить свою долю рынка и превратить давление, создаваемое циркулярной повесткой дня, в новые возможности или источник инновационного развития и модернизации. Однако следует отметить, что тематических исследований в области циркулярной экономики, особенно в угольной промышленности, не так много.

Статьи о внедрении принципов ЦЭ в отдельных секторах экономики, таких как горнодобывающая промышленность (Генг и др., 2012а [34]) и сталелитейная промышленность (Паулюк и др., 2012 [35]; Ванг и др., 2013 [36]), немногочисленны. Как отмечается в [37], существующая методологическая база не предусматривает создания стратегий устойчивого развития для горнодобывающих компаний, учитывающих современные тенденции развития циркулярной экономики.

К фундаментальным работам по данной теме относятся исследования ряда российских ученых, которые, начиная с 1930-х годов, обсуждали вопросы, связанные с многоцелевым использованием ресурсов, развитием горнодобывающих регионов, оптимизацией потерь при добыче и переработке руды, утилизацией отходов, применением передовых технологий. Были предложены различные подходы, включая полное использование всех полезных компонентов и строительство многоцелевых заводов [38, 39].

Многоцелевое использование минеральных ресурсов заключается в одновременном или последовательном извлечении из руд нескольких ценных компонентов по всей производственной цепочке. Степень многоцелевого использования увеличивается за счет расширения спектра извлекаемых ценных компонентов, а коэффициент использования растет за счет повышения степени извлечения. Эти два параметра зависят от того, насколько ассортимент конечных продуктов соответствует минералогическому и/или химическому составу перерабатываемого сырья [12, 38, 39].

Рациональное использование ресурсов заключается в расширении ассортимента товарной продукции и, как следствие, объемов производства, в том числе за счет вовлечения попутных полезных ископаемых. В результате рационального использования ресурсов стоимость товарной продукции максимизируется независимо от сферы ее применения [39].

Рациональное использование минеральных ресурсов можно достигнуть за счет [5-7, 38, 39]:

- сокращения потерь при извлечении основных полезных компонентов и улучшения качества сырья за счет редуцирования или разбавления;
- повышения коэффициента извлечения руды и увеличения количества применений побочных продуктов, включая вскрышные породы, торф, верхний слой почвы, грунтовые воды, отходы производства и т.д., если они имеются в достаточном для производства количестве;
- повышения уровня переработки отходов по всей производственной цепочке.

Таким образом, многоцелевое использование ресурсов – это частный случай рационального использования ресурсов. Это значит, что его нельзя рассматривать как нечто, встречающееся только на заключительном этапе производства в горнодобывающей отрасли – переработке полезных ископаемых. Многоцелевое использование ресурсов позволяет горнодобывающим компаниям обеспечить себя дополнительными ресурсными активами и продлить срок эксплуатации месторождения за счет вовлечения в производство попутных полезных ископаемых. Более того, часто бывает так, что общая стоимость попутных полезных ископаемых превышает стоимость ключевого полезного компонента и определяет рентабельность или целесообразность проекта. Вопросы, связанные с многоцелевым использованием ресурсов, являются предметом исследований в горной технике и других науках [40]. Постоянно меняются требования к качеству сырья, пересматриваются принципы классификации ресурсов и перспективы их использования. В работе Цистернас Л.А. [41] и др. анализируются современные усилия по применению ЦЭ в обогащении полезных ископаемых. Несмотря на достигнутый прогресс, этот обзор показывает, что наиболее значительные материальные потоки и воздействие на окружающую среду происходят вблизи мест добычи и переработки, которые в настоящее время ограничивают закрытие предприятий. Кроме того, горнодобывающая промышленность консервативно относится к внедрению новых технологий или стратегий переработки, что является еще одним препятствием для внедрения ЦЭ. «Кроме

того, горнодобывающая промышленность консервативна в отношении внедрения новых технологий или стратегий переработки, что является еще одним препятствием для внедрения ЦЭ. Таким образом, за редким исключением, в то время как некоторые отрасли уже находятся на продвинутых стадиях ЦЭ (а именно ЦЭ 3.0), в сфере переработки минерального сырья идет борьба за переход от базовых требований ЦЭ (т.е. ЦЭ 1.0 к ЦЭ 2.0)» [41].

На наш взгляд, одной из причин вязкости процесса внедрения ЦЭ в горнодобывающих компаниях является отсутствие концептуализации, проработанной теории и практического механизма применения классических моделей ЦЭ в специфической горнодобывающей бизнес-среде. Консервативность процесса наблюдается не только в реальном производстве, но и в научных публикациях, например, запрос по научным базам данных за период 2000–2021 гг. по термину «циркулярная экономика» выдает список из 18 540 публикаций, а по «горной промышленности» извлекается 92 публикации. Это составляет 0,5 % от общего числа, большинство из которых относятся к 2021 году, что свидетельствует о растущей популярности этой темы в секторе минеральных ресурсов. Все публикации можно разделить на два больших блока: решение локальных практико-ориентированных задач на примере конкретных месторождений; развитие теории и методологии ЦЭ с элементами увязки с устойчивым развитием, управлением рисками, разработкой моделей. Большинство публикаций посвящено решению локальных проблем конкретного региона: разработке технологических решений для снижения антропологической нагрузки; поиску альтернативных источников сырья в связи с естественным истощением минерально-сырьевой базы. Концептуализация проблем разработки и внедрения моделей ЦЭ в горнодобывающей промышленности отражена лишь в 15 % публикаций, что свидетельствует о необходимости дальнейших исследований в этом направлении.

Статьи, посвященные решению локальных проблем внедрения моделей ЦЭ в горной промышленности, в основном имеют технологический уклон и содержат вопросы: обращения с отходами горного производства различных типов, условий их образования, жизненного цикла (хвостохранилища, шлаки, оборот шахтных вод) [42–46], технологические, инновационные решения, в том числе использование интегрированных интеллектуальных систем в процессах добычи, транспортировки, обогащения [47, 48].

В исследовании китайских ученых [49] в разделе «Обсуждение модели циркулярной экономики горного производства» рассматриваются особенности угледобывающих предприятий, описывается цепочка переработки продукции, определяются потоки отходов после каждой переработки. «Она раскрывает смысл циркулярной экономики в горнодобывающей промышленности и конкретизирует содержание принципа 3R. На этой основе обсуждается модель циркулярной экономики в горнодобывающей промышленности на уровне предприятия, промышленного парка и общества в соответствии с текущей ситуацией с переработкой минеральных ресурсов в Китае. Затем на примере развития циркулярной экономики на уровне предприятия была построена система циркулярной экономики на предприятии угольной шахты» [49]. Однако в исследовании нет четкой классификации областей для разработки стратегии, а также вариантов моделей циркулярного бизнеса для различных типов угольных компаний.

В исследовании де ла Торре де Паласиос, Л., Эспи Родригес, Х.А. [50] говорится, что отходы горнодобывающей промышленности имеют различные характеристики в зависимости от стадии их образования. «Необходимо отделить те, которые образуются в процессе переработки или обогащения, от тех, которые неизбежно сопровождают цикл добычи в шахте без содержания полезных ископаемых. Последние гораздо больше по объему и имеют мало шансов быть повторно использованными в приемлемых экономических и экологических условиях» [50]. Данное исследование проводилось на примере горнодобывающей промышленности Либерии, то есть носит частный характер, и позволяет утверждать, что классификация отходов по стадиям переработки является важным компонентом с точки зрения определения правового статуса отходов и возможности их использования на собственном производстве или в смежных отраслях.

В исследовании [51] отмечается, что переход к устойчивой добыче полезных ископаемых может быть достигнут за счет внедрения циркулярной экономики (ЦЭ), и одним из путей к этому является использование систем «продукт-сервис». Основная идея заключается в том, что сервисные компании, например, поставщики оборудования, должны предлагать интеллектуальные

услуги горнодобывающим предприятиям, что, по мнению авторов, должно повысить эффективность работы как сервисных, так и горнодобывающих компаний. Аналогичный подход к достижению циркулярности отражен в работе Христовой Т. [52], в которой оцениваются эффекты и выгоды от внедрения электромобилей в горнодобывающей промышленности. На наш взгляд, результаты этих работ [52] оценивают узкую нишу горного производства только с точки зрения механизации и автоматизации, поэтому данные предложения могут быть использованы только как инструменты для механизма циркулярных бизнес-моделей.

Основной целью работы Калиш и др. [53] был обзор современных возможностей управления отходами в горнодобывающей промышленности по добыче металлических руд, угля, нефти и природного газа. Исследование включает в себя анализ и обсуждение возможностей повторного использования некоторых видов отходов, образующихся в результате горнодобывающей деятельности, что, по мнению авторов, должно не только способствовать более устойчивому управлению отходами горнодобывающей промышленности, но и отвечать современным усилиям по реализации предпосылок циркулярной экономики, направленной на замыкание цикла.

Концептуальная и методологическая основа процесса ЦЭ представлена современными работами, в которых рассматриваются вопросы циркулярности как элемента устойчивого развития для горнодобывающих компаний [54], управления рисками, цепочек поставок и добавленной стоимости как результата применения механизмов циркулярных моделей [55].

По мнению авторов статьи [54], «стимулом для активизации исследований, выходящих за рамки горнодобывающей отрасли и внедряющих лучшие циркулярные практики на микроуровне, могло бы стать включение показателей кругооборота в корпоративную отчетность по устойчивому развитию ПСУ, что отражало бы степень интеграции элементов ЦЭ в корпоративные стратегии. В настоящее же время подходы к ЦЭ в таких секторах, как горнодобывающая промышленность, остаются потенциальным фактором устойчивости компаний. Проблема, в частности, заключается в формировании устойчивых циркулярных бизнес-моделей, которые обеспечивали бы приемлемую рентабельность замкнутых цепочек поставок» [54]. В данном исследовании вопросы циркулярной экономики разделены на фрагменты, чтобы проиллюстрировать возможности для устойчивого развития.

Авторы статьи Упадхьяй А. и др. [55] утверждают, что горнодобывающая промышленность может извлечь пользу из изучения опыта других отраслей в области ЦЭ, что позволит своевременно продвигать инициативы в области циркулярной экономики. В этой статье авторы рассматривают несколько инициатив в области циркулярной экономики, предпринятых в горнодобывающей промышленности. Цель статьи – показать некоторые общие темы для трех крупных горнодобывающих компаний с помощью контент-анализа, а также оценить выявленные барьеры, движущие силы и триггеры этих инициатив в области циркулярной экономики.

Исследование Ли Х., Вэй Х. и Гао Х. [56] представляет новый опыт политики для понимания модели развития ЦЭ в горнодобывающей промышленности, включая изменения в политике ЦЭ в горнодобывающей промышленности, а также взаимосвязь между целями политики и инструментами политики, что способствует воспроизведению опыта политики ЦЭ в горнодобывающей промышленности. В статье отмечается, что постановка целей политики может быть расширена до тройного измерения выгод «экономика – окружающая среда – занятость» [56]; выбор инструментов политики должен основываться на механизмах структурированного обучения и обратной связи, определять эффекты от сочетания различных инструментов политики и динамично корректироваться в соответствии с ними; кроме того, выбор институциональных инструментов политики в развивающихся странах заслуживает большего внимания и дальнейшего сравнительного исследования между развивающимися и развитыми странами.

Существующая литература изобилует более техническими исследованиями горной промышленности. Однако существует пробел в использовании надежной методологии решения проблем ЦЭ в горной промышленности, чему и посвящена работа [57]. В этой работе на основе экспертного мнения и мозгового штурма проведена классификация и кластеризация проблем внедрения ЦЭ в горной промышленности на примере развивающихся стран (Индия). Выявлено, что большинство проблем находится в кластере, который является важным и значимым для отрасли. Любые манипуляции с этими факторами должны принести положительные результаты, чтобы перейти к внедрению ЦЭ.

В статье говорится, что «внедрение ЦЭ в данной компании и других горнодобывающих компаниях будет возможно только в том случае, если каждая отдельная фирма определит проблемы и разработает подходящие стратегии для их решения» [57].

Исходя из анализа литературы, можно утверждать, что наиболее возможными вариантами внедрения бизнес-моделей ЦЭ являются:

- современные технологии добычи природного сырья (угля), обеспечивающие рациональное использование ресурсов и снижение потерь руды;
- многоцелевое использование месторождений полезных ископаемых за счет использования существующей инфраструктуры для разработки;
- многоцелевое использование минерального сырья (целевых компонентов, попутных компонентов и отходов), позволяющее повысить степень переработки.

3. Материалы и методы

В ходе исследования были использованы книги и статьи ученых России и других стран по темам, касающимся теоретических вопросов использования циркулярных моделей в горнодобывающей промышленности, а также материалы, освещающие примеры рационального и многоцелевого использования ресурсов в угольной отрасли, включая утилизацию отходов горного производства, переработку угля и его сжигание.

Цикл нашего исследования был построен следующим образом.

(1) Кейс-анализ: современные варианты использования ресурсов (полезных ископаемых) угольных компаний в соответствии с технологическими и экологическими критериями циркулярности. Промежуточный результат этапа: расширенная классификация направлений рационального и комплексного использования недр, минерального сырья и отходов угольных предприятий.

(2) Оценка специфики производственных циклов угольных компаний. Промежуточным результатом этапа является определение типов компаний, этапов переработки продукции в угольных, угольно-энергетических и металлургических компаниях.

(3) Трансформация эталонных циркулярных моделей в отраслевые циклические модели путем объединения направлений (1) и стадий производственных этапов (2). Результатом является концептуальная схема формирования отраслевых базовых циркулярных моделей, учитывающая принцип сохранения ценности ресурсов на протяжении всего их жизненного цикла.

(4) Анализ возможностей внедрения и реализации отраслевых базовых циркулярных моделей (3) в компании. Результатом является механизм стратегического управления через реализацию проектов от поддержания и воспроизводства до расширения и роста компании.

В исследовании использованы кабинетные методы анализа эффективности циркулярных моделей. Мы собрали, проанализировали и обработали вторичную информацию, проанализировали практический опыт рационального использования ресурсов в горнодобывающей отрасли, а также с помощью метода трансформации преобразовали базовые циркулярные бизнес-модели в модели, адаптированные к условиям работы угольных компаний.

Методология разработки моделей циркулярного бизнеса базировалась на нижеследующих принципах.

- Максимальное использование ресурсов. Все добытые минеральные ресурсы, включая отходы добычи и переработки, рассматриваются как потенциальное сырье или материалы для использования в хозяйственной деятельности, направленной на производство дополнительных видов или объемов продукции при наличии соответствующих технологий.
- Минимальное вовлечение дополнительных ресурсов. Интенсивное использование минеральных ресурсов предполагает создание дополнительных видов продукции из сырья без привлечения или с незначительным привлечением других природных ресурсов.
- Использование экологической оценки в качестве одного из ключевых показателей эффективности, определяющих выбор циркулярной модели.
- Учет организационно-технологических условий в угольных компаниях.
- Учет роста эффективности деятельности, стратегического роста и устойчивого развития в угольном секторе.

Для обсуждения организационно-технологических условий используются примеры нескольких российских угольных компаний. Они имеют типовые структуры, характерные для европейских, австралийских и азиатских угольных компаний.

В российском угольном секторе много игроков, но только пять из них обеспечивают более половины отечественной добычи угля. Первая группа компаний специализируется исключительно на добыче угля. Среди них – Сибирская угольная энергетическая компания (АО «СУЭК»), «СДС-Уголь» и другие. В основе функционирования угледобывающих компаний лежат процессы добычи, переработки и транспортировки угля. Например, «СДС-Уголь» управляет тремя разрезами, двумя подземными шахтами, тремя обогатительными фабриками и рядом сервисных компаний. СУЭК управляет 15 подземными и 12 открытыми разрезами в Сибири и на Дальнем Востоке, которые добывают около 28 % всего угля в России, и 24 электростанциями, обслуживающими более 5 млн жителей Сибири [58].

Вторая группа состоит из энергетических компаний, которые совмещают добычу угля и производство электроэнергии. Например, «ЕвроСибЭнерго» управляет угледобывающей компанией «Востсибуголь», пятью гидроэлектростанциями и одиннадцатью тепловыми электростанциями [58], т. е. конечными продуктами энергетических компаний являются уголь и энергия.

В третью группу входят производители металлов, такие как ПАО «Северсталь», ОАО «УГМК», ПАО «Мечел», «Евраз Груп С.А.» [59]. Они работают по принципу полного цикла и занимаются добычей и обогащением угля и руды, а также производством металла и металлопродукции с высокой добавленной стоимостью и переработкой вторичных ресурсов. В отличие от энергетических и угледобывающих компаний, производители металла предлагают широкий ассортимент продукции и продают уголь, железную руду, сталь, чугун и металлопрокат [58, 60].

Поскольку компании специализируются, производя либо уголь, либо металлы, это определяет комплексный характер производственных структур. В большинстве случаев холдингами являются как российские компании, так и компании из других угледобывающих стран (табл. 1) [58-60].

Для адаптации пяти универсальных бизнес-моделей к условиям работы угольных компаний в статье использована макросхема распределения ресурсов от добычи до производства.

Таблица 1

Примеры компаний по специализации. Источник: составлено авторами на основе [58-60]

Страны	Добыча угля	Отрасли специализации Металлургическое производство	Энергия
Китай	Китайская компания Шэньхуа Энерджи Ко		Шэньхуа, Угольная энергетика
Россия	Российский уголь	УГМК, Мечел, ЕВРАЗ Групп С.А.	СУЭК, СДС-Уголь, ЕвроСибЭнерго
Австралия	Уайтхейвен Уголь Гленкор	БХП Биллитон	
Индия	Анмол Индия Лимитед	Коал Индия Лимитед (CIL) Эмерджент Индастриал Солюшнс Лтд.	
Польша		Компания Венглова Ястребская компания Венглова	
США	Пибоди Энерджи Арч Ресорсиз	Альфа Металлургические ресурсы	КОНСОЛ Энерджи Инк.

Из блок-схемы следует, что структура ресурсов включает: (1) добытые полезные ископаемые; (2) потери руды; (3) готовая продукция и (4) остатки минеральных ресурсов. Последние частично возвращаются обратно в производственную цепочку, где превращаются во вторичное сырье, а частично используются для производства непрофильной продукции, становясь побочными продуктами. Они также могут использоваться другими компаниями или складироваться в отвалах, образуя техногенные месторождения, которые могут быть использованы для разработки и производства

товарной продукции или оказания услуг. Важной особенностью минеральных активов являются колебания их стоимости. Колебания могут быть вызваны как рыночными, так и технологическими факторами (например, новая технология извлечения ценных компонентов может повлиять на цены на ресурсы).

В разделе «Результаты» рассматриваются примеры использования угля, его побочных продуктов и отходов добычи и переработки на разных этапах. Примеры разбиты на три группы, что наилучшим образом отражает особенности производственного процесса в горнодобывающем секторе и соответствует принципам пяти стандартных бизнес-моделей ЦЭ, включая кругооборот поставок, продление срока службы продукции и регенерацию ресурсов. В исследовании приведены примеры:

- современные технологии добычи природного сырья (угля), обеспечивающие устойчивое использование ресурсов и сокращение потерь руды;
- многоцелевое использование месторождений полезных ископаемых за счет использования существующей инфраструктуры для разработки;
- многоцелевое использование минерального сырья (целевых компонентов, попутных компонентов и отходов), позволяющее повысить степень переработки.

Проанализировав примеры рационального и многоцелевого использования ресурсов, мы разработали конфигурации моделей циркулярного бизнеса, адаптированные к условиям угольной промышленности. Модели учитывают способы использования ресурсов – угля, метана и т. д.), стадии производства, а также способ реализации проекта с возможными эффектами.

4. Результаты

4.1. Анализ текущего уровня и возможностей рационального использования запасов и ресурсов полезных ископаемых

Пример 1. Рациональное использование ресурсов достигается в первую очередь за счет снижения потерь руды на стадии добычи. В угледобыче одним из наиболее эффективных подземных способов добычи с точки зрения объемов производства является лавинная добыча [61]. Однако существенным недостатком этого способа добычи являются значительные потери угля в столбах, которые могут достигать 20 %, или 600-800 тыс. тонн угля [62].

Тем не менее, эта система широко используется крупнейшей российской угольной компанией СУЭК для добычи высококачественного угля в Кузнецком бассейне, который является самым важным угольным бассейном в России. Эта компания добывает около 30 % угля в России, из которых 93 % приходится на лавовый метод добычи [63].

В настоящее время жизнеспособные запасы в Кузнецком бассейне сокращаются в среднем на 630 млн тонн в год [62], а объем запасов, которые сначала были признаны жизнеспособными, но затем сняты с баланса, превышает годовой объем добычи. Например, в 2017 году было списано 388 млн тонн угля, в то время как добыто всего 241,5 млн тонн. Если ситуация не изменится, потери угля будут только расти. Эта проблема не ограничивается российскими компаниями, она не менее актуальна для угледобывающих отраслей Австралии, Китая, США и Украины [62].

Пример 2. Утилизация выработанных территорий. Существует целый ряд способов использования инфраструктуры, созданной для добычи полезных ископаемых. Выработанные территории могут быть превращены в хранилища, лаборатории, бальнеологические учреждения, музеи, концертные залы и т. д. Основные направления освоения подземных пустот в действующих и закрытых шахтах: для промышленных целей (заводы и лаборатории, электростанции, обогащательные фабрики, перколяторные емкости); для сельскохозяйственных целей (хранение запасов продуктов, силосные ямы, выращивание грибов); для оборонных целей (заводы, убежища для людей и техники, ракетные установки, аэродромы); хранилища и кладбища (хранение нефти, газа и других стратегических запасов, резервуары для забалансовой руды и хвостов. Захоронения бытовых, токсичных, химических и радиоактивных отходов); для культурных целей (подземные торговые и деловые центры, спортивные сооружения, гаражи, музеи, магистрали, инженерные коммуникации); для медицинских целей (гала-спелеотерапия в солях, радоновые ванны) [64].

Пример 3. Добыча и использование попутного полезного ископаемого. Наиболее яркий пример – добыча и переработка метана угольных пластов. В настоящее время этот ресурс используется в химической промышленности, а также в качестве топлива для тепловых электростанций, газовых турбин, металлургических печей и т. д.

Метан может быть извлечен как побочный продукт в процессе газовой выделения из угольных шахт. В этом случае его называют шахтным метаном (ШМ). Эффективность извлечения достигает 10-20 % при содержании метана в газовой смеси от 30 до 45 %. Метан также может быть извлечен как самостоятельный полезный компонент с помощью скважин, пробуренных с поверхности, с эффективностью извлечения 60-70 % при содержании метана в газовой смеси 75-98 %. В этом случае его называют метаном угольных пластов (МУП) [65-67].

Содержание метана определяет область применения продукта. Необходимое содержание варьируется в следующих пределах: химическая промышленность – 92-95 %; топливо для котельных и местных тепловых электростанций – 30-40 %; бытовые нужды – 92 %; газовые турбины, электрогенераторы, металлургические и коксовые печи – не менее 40 % [66].

Совместное использование угля и метана, в том числе на ТЭЦ, значительно повышает эффективность процесса производства тепла и электроэнергии в едином цикле и снижает выбросы CO₂. В химической промышленности метан используется для производства сажи, аммиака, водорода, метанола, ацетилена, азотной кислоты, формалина, пластмасс и искусственных волокон [67, 68]. В промышленных отложениях метан производится в США (55 млрд м³), Канаде (9,3 млрд м³), Австралии (5,5 млрд м³), Китае (1,4 млрд м³), Великобритании, Германии и Польше. США и Австралия являются основными разработчиками и экспортерами технологий для добычи МУП [69-72]. В России используется около 10 % от общего объема (1 млрд м³) шахтного метана, образующегося при газовой выделении. ООО «Газпром добыча Кузнецк» – первая и единственная компания в России, имеющая лицензию на добычу МУП в промышленных отложениях [69]. Метан рассматривается либо как нетрадиционный источник энергии, либо как сырье для производства моторного топлива по технологии добычи угля [73, 74]. Перспективы мировой промышленной добычи метана к 2030 году оцениваются в 100-150 млрд м³ в год. В дальнейшем она может возрасти и достичь 470-600 млрд м³. По разным оценкам, в 70 странах мира может находиться от 84 до 360 трлн м³ МУП. Оценка российских запасов МУП колеблется от 17 до 113 трлн м³ [65].

Пример 4. Многоцелевая переработка угля предусматривает его использование не только в качестве топлива, но и как ценного сырья с уникальными свойствами для химической промышленности. Например, бурый уголь используется для производства гуминовых реагентов, а антрациты – для изготовления электродов и адсорбентов. Уголь рассматривается как материал для синтеза жидкого топлива, или каменноугольного масла, путем гидрогенизации или газификации. По своим свойствам он идентичен природной нефти, но отличается меньшим содержанием серы. В России основные ресурсы угля для сжижения сосредоточены в Канско-Ачинском, Кузнецком, Иркутском и Ленском угольных бассейнах и оцениваются в 200 млрд тонн [75].

Уголь также можно рассматривать как нетрадиционный источник редких (Ge), микроэлементов (Sc, W, Sb, U, In, Ga, Rb, Sr, Cs, Zr) и редкоземельных элементов (РЗЭ), металлов платиновой группы (МПГ) и драгоценных металлов (Ag) [76, 77]. При современном уровне развития технологий германий, РЗЭ, золото и скандий могут быть извлечены из угля в промышленных масштабах, что значительно повышает общую стоимость добываемых ресурсов.

Следует отметить, что угольная зола (продукт сжигания угля на ТЭЦ) содержит еще более высокие концентрации РЗЭ и ценных металлов, чем уголь. В 1 т золы некоторых углей Кемеровской области может содержаться до 1 кг урана, а в 1 т бурого угля из США – более 3 кг урана [77].

По данным исследований, объем золоотвалов в России к 2030 году может превысить 2 млрд тонн. Учитывая возможность использования золы как нетрадиционного ресурса, можно предотвратить образование техногенных месторождений и сохранить запасы полезных ископаемых за счет повторного использования золы. Извлечение РЗЭ из угля или золы может сделать тепловые электростанции более экологичными и обеспечить промышленность стратегическим сырьем.

Аналогичный эффект может быть достигнут при использовании вскрышных пород, или отходов горного производства. В России ежегодно образуется 6850,5 млн тонн отходов добычи и переработки полезных ископаемых, из них на долю угольных компаний приходится 4816,5 млн тонн (70,5 %), что делает особенно актуальным внедрение моделей циркулярного бизнеса в угольной отрасли [77].

Вскрышные породы могут использоваться для производства щебня, кирпича для рекультивации земель после открытых горных работ или дорожно-строительных материалов. В таблице 2 показано, как отходы добычи и переработки угля могут быть использованы горнодобывающими компаниями и смежными отраслями.

Таблица 2

Применение угольных отходов. Источник: [77]

Применение угольных отходов	Специализация компании		
	Добыча угля	Энергия	Производство металла
Топливо	Уголь, метан	Зола-унос, тепло, вырабатываемое электростанциями	Энергия, используемая металлургическими печами
Черные и цветные металлы, их соединения и сплавы	Черные и алюминиевые сплавы (Fe, Al, Al ₂ O ₃ , Al-Si)	Сплавы летучей золы (Fe-Si, Al-Si, Ge, Ga, Mo)	Черные сплавы из окисленного кварца и другие (V; Co; Cu; Ni; Ti; Zr; Zn; Mg; Ba; Ta; Nb и т.д.)
Уголь химикаты, сельское хозяйство	Материалы для известкования почв; серная кислота из пирита	Серная кислота из отходящих газов; микроудобрения	Фосфорные удобрения
Строительные материалы	Заполнитель из летучей золы; щебень	Щебень; зольный гравий; заполнитель из летучей золы; кирпич	Щебень; шлакобетон; цемент; огнеупорные материалы; песок; известь
Ядерные материалы		Уран	

4.2. Разработка концептуальной основы для циклических моделей

На примере угольных компаний были определены следующие варианты рационального и многоцелевого использования ресурсов:

- сокращение потерь угля; использование отходов от добычи и переработки угля в экономических целях;
- использование угля и техногенных ресурсов для извлечения полезных компонентов и производства новых видов продукции;
- вовлечение в производство сопутствующих ресурсов;
- переход от производства промежуточных товаров к новым видам продукции.

Варианты рационального и многоцелевого использования ресурсов должны учитываться на стадии разработки горнодобывающих проектов, а также в дальнейшем, по мере появления новых технологий или изменения рыночной конъюнктуры. Они могут быть реализованы в виде проектов по модернизации, обновлению или диверсификации.

На макроуровне стратегии эффективного использования ресурсов (S_i) можно разделить на стратегии поддержания существующих производственных процессов, стратегии диверсификации и стратегии роста. Комбинации вариантов эффективного использования ресурсов (R_i) и этапов производства (T_i) образуют циркулярные бизнес-модели. Реализация циркулярной бизнес-модели (T_i ; R_i) предполагает разработку стратегии (S_i), которая является функцией $S_i = f(T_i; R_i)$. В таблице 3 представлена концептуальная схема разработки циркулярных бизнес-моделей для условий угольных компаний. Она представлена в виде диаграммы на рисунке 2.

Концептуальная основа разработки моделей циркулярного бизнеса на отраслевом уровне для угольного сектора. Источник: составлено авторами

Варианты эффективного использования ресурсов (R_i)		Стадия производства (T_i)					Модель СЕ
		Производство угля	Переработка угля	Угольная химия	Тепловая энергетика	Металлургическая обработка	
		T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	$S_i = f(T_i; R_i)$
Сокращение потерь руды	R_1	+					
Использование отходов от добычи и переработки угля в экономических целях	R_2	+	+	+	+	+	
Извлечение сопутствующих ценных компонентов	R_3	+	+	+	+	+	
Извлечение новых ценных компонентов	R_4	+	+				
Производство новых видов продукции	R_5		+	+	+	+	
Добыча попутных полезных ископаемых	R_6			+		+	
Переход от производства промежуточных товаров к новым видам продукции	R_7			+	+	+	
Варианты реализации стратегий эффективного использования ресурсов (S_i)							
Поддержание существующих производственных процессов	Диверсификация			Рост компании			
S_1	S_1			S_1			
$S_i = f(T_i; R_i)$							

Разнообразие моделей обусловлено различиями в характеристиках полезных ископаемых, инвестициях, необходимых для развития производства и инфраструктуры, структуре производственных процессов и организационных структурах горнодобывающих компаний.



Рис. 2. Схема концептуальной основы для разработки моделей циркулярного бизнеса. Источник: составлено авторами

5. Обсуждение

Циркулярные бизнес-модели – это инструменты управления, создающие экономические условия для реализации проектов в производственной и других сферах. Бизнес-модели позволяют повысить инвестиционную привлекательность инновационных проектов, создать новые бизнес-процессы и новые цепочки создания стоимости, обеспечивающие реализацию проектов, в том числе использование наилучших доступных технологий (НДТ) в горнодобывающей промышленности.

К проектам, интегрированным в производственный процесс, можно отнести: внедрение малоотходных технологических схем разработки месторождений, проекты организации производства по замкнутому циклу (внутренняя переработка), проекты, предусматривающие использование отходов во вспомогательном производстве, технологии рекультивации, защиты от экологически опасных веществ, содержащихся в отходах. В качестве специфических задач проектов, интегрированных в производственный процесс, можно рассматривать следующие задачи: снижение затрат, связанных с размещением и хранением отходов; экономия материальных и трудовых ресурсов; создание условий для безопасного труда.

Проекты, направленные на развитие компании, должны быть согласованы со стратегическими целями. Такие проекты носят диверсификационный характер, как правило, предполагают выпуск новых видов продукции и расширение ассортимента, производство продукции с более высокой добавленной стоимостью. Вертикальная диверсификация предполагает создание непрерывного технологического процесса добычи, переработки и сбыта готовой продукции, то есть внедрение проектов, направленных на минимизацию образования отходов добычи и обогащения, а также переработки образующихся отходов. Реализация вертикальной диверсификации возможна за счет включения в технологическую цепочку новых этапов: добычи, обогащения, металлургической переработки с целью сокращения жизненного цикла отходов. Горизонтальная диверсификация основана на создании нового продукта на основе существующих или новых технологий по профилю компании, расширении каналов сбыта продукции и росте отложения деятельности. Несвязанная диверсификация предполагает выход за пределы отрасли, то есть формирование новых видов деятельности – производство дополнительных продуктов с высокой добавленной стоимостью и выход на новые рынки. Примером несвязанной диверсификации являются проекты по производству материалов из отходов горнодобывающей промышленности для строительной отрасли. За счет реализации диверсификационных проектов внутри компании достигается эффект комплексного использования минерального сырья, рост стоимости компании, производство продукции с высокой добавленной стоимостью, снижение экономических и экологических рисков.

Модель 1 (использование отходов добычи и переработки угля в хозяйственных целях) может быть использована в рамках одной компании. Она не требует больших инвестиций и может быть реализована как организационный проект. Создаваемые эффекты включают экономию материальных ресурсов, снижение материальных затрат и экологических издержек.

Модель 2 (использование угля и техногенных ресурсов для извлечения полезных компонентов и производства новых видов продукции) может быть использована и в рамках одной компании. Она требует инвестиций в реконструкцию и модернизацию производства при формировании новых производственных структур. Создаваемые эффекты включают экономию на новых лицензиях на добычу, увеличение объемов производства, выход на новые рынки, внедрение новых технологий, получение новых знаний. Модель может быть модифицирована в зависимости от характеристик полезных ископаемых, объема дополнительных инвестиций, необходимых для развития ключевых производственных процессов и инфраструктуры, сложности производственных процессов и организационной структуры.

Модель 3 (вовлечение в производство попутных ресурсов) может использоваться в рамках отдельных проектов. Она формирует самостоятельные производственные комплексы, требующие значительных инвестиций. Возникают такие эффекты, как диверсификация бизнеса, создание новых видов бизнеса, экономия на новых лицензиях на добычу полезных ископаемых.

Модель 4 (переход от производства промежуточных товаров к новым видам продукции) может быть использована в рамках комплексных проектов. Она требует значительных инвестиций

в инновации и формирует новые организационные структуры. Создаваемые эффекты включают внедрение новых технологий, приобретение новых знаний, переход к новому виду деятельности, выход на новые рынки.

Использование адаптированных циркулярных бизнес-моделей в горнодобывающей промышленности и переработке минерального сырья может стать драйвером модернизации горнодобывающих компаний [78,79]. Важно разрабатывать инновационные производственные процессы, позволяющие превращать отходы или побочные продукты одной отрасли в ресурсы для другой. Горнодобывающие предприятия могут стать объектами для применения подхода, основанного на циркулярной добыче. Горнодобывающие предприятия могут стать объектами для применения подхода «циркулярной добычи». Помимо традиционного учета влияния горнодобывающей деятельности на окружающую среду и общество в рамках стратегий устойчивого развития, горнодобывающие компании могут реализовывать проекты по минимизации негативного воздействия, обмену передовым опытом и сокращению отходов.

Следует признать, что добиться безотходности в горнодобывающей промышленности достаточно сложно, в отличие от примера с пищевыми отходами [80], в силу специфики объекта. Предложенное исследование [80] «включило в себя интеграцию управления SC и ЦЭ через разработку инвентаризации в рамках концепции 3R: «Перенаправление, сокращение и переработка». Отходы, образующиеся в первичной цепочке поставок, перенаправляются во вторичную цепочку в качестве сырья. Это также помогает сократить объемы утилизации или захоронения на полигонах». Что касается идентификации отходов горнодобывающей промышленности, то здесь ситуация не однозначна. Во-первых, закон «О недрах» в Российской Федерации не дает определения отходам горнодобывающей промышленности и связанным с ними объектам переработки. Во-вторых, закон определяет использование отходов горного производства как вид недропользования, что ограничивает возможности компаний по утилизации отходов. Одна из задач, которую мы решаем в своей работе, – привлечь внимание к вопросам неуниверсальности процесса и продукта деятельности горнодобывающих компаний. В то же время, возможность и необходимость разработки и реализации проектов по рациональному использованию ресурсов, что потребует определенных усилий и заинтересованности компаний. Более того, поскольку речь идет об угольных ресурсах, мы подчеркиваем особую важность использования технологических инноваций в углехимии, которые позволят вывести отрасль на новый уровень развития: переход к глубокой переработке сырья и расширению ассортимента выпускаемой продукции. В нашем исследовании предпринята попытка оценить возможности угольной промышленности от модели 3R к модели 9R, так как при экстенсивном недропользовании целесообразность подобных проектов не всегда очевидна.

На наш взгляд, наибольший потенциал для угольных компаний в области циркулярности имеет модель рекуперации ресурсов, поскольку новые технологии, внедряемые в процессы угледобычи, позволяют снизить потери угля и повысить эффективность производства за счет сокращения отходов добычи и переработки. Это также создает возможности для рекультивации земель и снижения негативного воздействия на водные, земельные и воздушные ресурсы.

Модели восстановления ресурсов для угольных компаний могут быть реализованы с помощью ряда программ (или мер) по рациональному и многоцелевому использованию ресурсов, в том числе с помощью стратегии диверсификации.

Платформа совместного использования и «продукт-сервис» могут быть использованы в совместных проектах по разработке месторождений полезных ископаемых или по обмену, или аренде дорогостоящего оборудования.

В рамках модели восстановления ресурсов, применяемой при обращении с отходами, ключевыми методами являются рециклинг, регенерация и восстановление [78], что соответствует концепции 3R. Рециклинг играет важную роль, обеспечивая переработку шахтных отходов. Управление отходами в горнодобывающем секторе в основном связано с вскрышными породами, образующими отвалы, и ограничено 5R [30]. Возможен переход к концепции 6R (которая охватывает все этапы жизненного цикла продукции) при управлении отходами, образующимися в результате использования энергии и ресурсов или материалов из других отраслей.

Переход к концепции 9R возможен в перечисленных ниже случаях.

1. Горнодобывающая компания является частью вертикально интегрированной компании (ВИК). Вертикальная интеграция позволяет добиться согласованности действий производителей по всей производственной цепочке и добавить в программу управления отходами методы ответственного потребления.

2. Горнодобывающая компания является частью конгломерата. Широкий ассортимент выпускаемой продукции, в том числе конечной, позволяет добавить в программу управления отходами методы ответственного потребления.

3. Горнодобывающая компания является частью циркулярного промышленного кластера или экопромышленного симбиоза, что позволяет повторно использовать отходы и совместно предоставлять и/или использовать услуги, инфраструктурные объекты и оборудование (в рамках моделей совместного использования платформ PaaS и регенерации ресурсов). Например, 14 июля 2021 года правительство Кемеровской области подписало распоряжение № 359-р «Об утверждении Стратегии развития кластера по многоцелевой переработке угля и промышленных отходов в Кемеровской области (Кузбассе) до 2030 года» [79]. Стратегические цели кластера – повышение конкурентоспособности региональной экономики за счет внедрения результатов НИОКР малого и среднего бизнеса; привлечение инноваций и международного опыта в области многоцелевой переработки угля (в том числе глубокой переработки) и переработки отходов, образующихся при добыче, обогащении и сжигании; геологоразведка; модернизация горнодобывающих предприятий путем разработки новых технологий для разработки месторождений со сложными геологическими условиями и создания оборудования, позволяющего оптимизировать существующие производственные процессы; альтернативное (не топливное) использование угля (технологии газификации и переработки угля в жидкое топливо); безопасность технологических процессов и экологическая безопасность (технологии управления человеческим фактором и повышения компетентности работников угольной отрасли); вопросы логистики [79,81].

Таким образом, авторы считают, что мнение о том, что горнодобывающая отрасль потенциально подходит для моделей ЦЭ, но не является фокусной областью [3], даже не сомнительно, а несостоятельно. Горнодобывающая промышленность имеет большие возможности для внедрения принципов ЦЭ. Более того, именно в этой отрасли существует острая необходимость внедрения циркулярных бизнес-моделей.

Однако реорганизация существующих бизнес-процессов при переходе к циркулярной экономике несет в себе не только дополнительные положительные эффекты, но и новые риски для целого ряда отраслей. К положительным эффектам относятся: сокращение потребления невозобновляемых ресурсов; уменьшение экологических штрафов; появление новых рабочих мест в результате возникновения новых секторов экономики, что приводит к росту потребительского спроса; инновационный рост отраслей и систем распределения, что приводит к появлению новых центров прибыли; потребители получают возможность покупать более экологичные товары, которые, в ряде случаев, имеют более низкие цены; сокращение выбросов CO₂ и площадей, отводимых под полигоны и захоронение отходов. В то же время повторное использование товаров приведет к снижению продаж. В зоне риска оказываются не только производители конечной продукции, но и компании, производящие сырье. Компании сырьевого сектора могут столкнуться со снижением спроса на свою продукцию. Однако эти риски требуют дополнительной оценки.

Циркулярная модель выходит за рамки простой утилизации отходов и требует эффективного и рационального использования природных ресурсов на протяжении всего их жизненного цикла.

На наш взгляд, анализ жизненного цикла (АЖЦ) применительно к полезному ископаемому проявляется в количестве этапов производства конечной продукции, и отчасти мы пытались осветить это через горнодобывающие компании. Чем выше вертикальная диверсификация производства, тем длиннее производственная цепочка в рамках одной компании, но и это не гарантирует эффективности циркулярного подхода. В то же время, если оценивать жизненный цикл самой компании, то с учетом ограниченного срока работы горнодобывающих компаний из-за тонкости минералов в недрах, использование циркулярных моделей позволяет продлить жизненный цикл компании.

Оптимизация процессов может быть достигнута за счет: реализации новых проектов на действующих предприятиях (компания самостоятельно определяет границы своего расширения, модернизации); априорного использования инновационных схем добычи и переработки минерального сырья на этапах проектирования новых предприятий. В качестве стимулов для такого подхода должны выступать институциональные инструменты обязательного или стимулирующего характера со стороны государства. Основным недостатком системы циркулярного подхода в горнодобывающей промышленности является отсутствие жестко регламентированных требований со стороны государства. Это позволяет горнодобывающим компаниям использовать систему компенсаций в виде экологических платежей, которая обходится гораздо дешевле, чем циркулярный подход.

Концептуальная схема не предполагает системы показателей для оценки уровня циркулярности. Разработанные и адаптированные модели ЦЭ основаны на принципах учета экологической эффективности, что отражается в анализе случаев, где экологической составляющей уделяется большое внимание, однако детальное представление экологических и социальных эффектов и рисков требует дальнейших исследований. Ограничением является отсутствие комплексной экономической оценки реализации проектов ЦМ и отсутствие оценки эффектов смежных отраслей. Важные будущие разработки для внедрения циркулярных бизнес-моделей потребуют дополнительной работы по развитию инструментов оценки для улучшения процесса принятия решений.

Основное ограничение данного исследования заключается в том, что предложенные модели носят концептуальный характер и не учитывают уникальные для каждой компании условия, касающиеся таких аспектов, как технологии, управление и финансы. Концептуальная схема не содержит системы показателей для оценки степени кругооборота. В данном исследовании мы ограничились построением только общей модели. В дальнейшем мы планируем оценить эффективность циркулярной модели. В качестве основного критерия предполагается обосновать социально-экономическую и экологическую эффективность модели. Предложенные в статье адаптированные модели ЦЭ основаны на принципах учета экологической эффективности, что нашло отражение в анализе кейсов, где основной акцент сделан на экологической составляющей, однако детальное представление экологических и социальных эффектов и рисков требует дальнейших исследований. Еще одним ограничением является отсутствие экономической оценки реализации проектов ЦЭ на макроуровне и отсутствие оценки эффектов, получаемых смежными отраслями.

В будущем необходимо рассмотреть больше отраслевых примеров в различных промышленных секторах, чтобы всесторонне продемонстрировать полезность концепции. Данная структура сосредоточена в основном на анализе добывающей промышленности в рамках реализации закрытых моделей через механизмы комплексного и рационального использования природных ресурсов. В исследовании не рассматриваются детально потоки ресурсов для процессов добычи и обогащения, что потребует дополнительного рассмотрения и анализа. Важные будущие разработки по внедрению циклических бизнес-моделей потребуют более масштабной работы по созданию инструментов оценки для повышения эффективности принятия решений. Вопросы механизма внедрения этих моделей с точки зрения нормативно-правовой поддержки и условий взаимодействия заинтересованных сторон подлежат детальному рассмотрению, что важно для обеспечения процесса перехода к ЦЭ.

6. Выводы

Несмотря на то, что горнодобывающая промышленность является первичным звеном в производственной цепочке и производителем сырья для перерабатывающих отраслей, она обладает большим потенциалом и возможностями для внедрения принципов ЦЭ. Цель данного исследования заключалась в разработке концептуальной основы вариантов циркулярной бизнес-модели, адаптированной к условиям угольной промышленности. Теоретической основой работы послужили современные концептуальные основы циркулярной экономики, классические бизнес-модели и концепция рационального и комплексного использования минеральных ресурсов. Раздел «Результаты» содержит описание кейсов, разделенных на три группы. Эти группы отражают специфику производственного процесса в горнодобывающей отрасли и соответствуют принципам стандартизации моделей циркулярного бизнеса. В ходе исследования разработана концептуальная схема вариантов моделей циркулярного бизнеса, адаптированная к условиям угольной промышленности. Разработанные

отраслевые модели носят концептуальный характер и получены на основе сочетания вариантов эффективного использования ресурсов с условиями стадии технологического процесса угольной компании. В основе моделей лежат принципы оценки путей эффективного и рационального использования ресурсов с учетом стадии производственного процесса и механизма реализации проекта в рамках горнодобывающего предприятия. Внедрение циркулярных бизнес-моделей предполагает формирование бизнес-стратегии на уровне компании. Предложенная концептуализация моделей циркулярного бизнеса может быть использована угольными компаниями для разработки и реализации корпоративных стратегий и долгосрочных планов развития. Результаты исследования могут быть использованы в дальнейших исследованиях, связанных с разработкой механизмов устойчивого развития угольных компаний в условиях циркулярной экономики, в том числе с разработкой критериев и методов оценки эффективности применения циркулярных бизнес-моделей. В прикладной части исследования доказано, что циркулярные бизнес-модели являются организационно-управленческим инструментом, создающим экономические условия и систему мотиваций для реализации технологических и иных проектов. Бизнес-модели могут повышать инвестиционную привлекательность инновационных проектов, формировать новые бизнес-процессы и создавать новые цепочки создания стоимости. В будущих исследованиях предлагается оценивать эффективность циркулярной модели. В качестве основного критерия предполагается обосновать социально-экономическую и экологическую эффективность модели.

Вклад авторов: концептуализация, О.М.; методология, О.М., Н.К. и М.Н.; написание – подготовка первоначального проекта, О.М., Н.К. и М.Н.; написание – рецензирование и редактирование, О.М., Н.К. и М.Н. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление о доступности данных: не применимо.

Конфликты интересов: авторы не заявляют о конфликте интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Glinina, O.I. Tretij Mezhdunarodnyj frum «Rossijskaya energeticheskaya nedelya». Ugol' 2020, 1, 4–19. <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-1-4-19>
- Lyalin, A.M.; Zozulya, A.V.; Eremina, T.N. i dr. Sovremennye tendencii razvitiya ugol'noj promyshlennosti s uchetom vliyaniya pandemii. Ugol' 2021, 62–65. <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-5-62-65>
- Knysh, V.A.; Ivanova, L.V. Cirkulyarnaya ekonomika: Ugroza dlya predpriyatij gornodobyvayushchego sektora ili drajver ih tekhnologicheskogo razvitiya? Gorn. Zhurnal 2020, 9, 33–41. <http://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.04>
- Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. 2020. Available online: <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climate-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf> (accessed on 1 October 2022).
- Herrington, R. Mining our green future. Nat. Rev. Mater. 2021, 6, 456–458. <http://doi.org/10.1038/s41578-021-00325-9>
- The Role of CriticalWorld Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions IEA. All Rights Reserved. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Available online: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/24d5dfbb-a77a-4647-abcc-667867207f74/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf> (accessed on 1 October 2022).
- Young, A.; Maria, L. Drivers and Opportunities. Barreto, Materials Efficiency Research Group Karen Chovan. Towards a Circular Economy Approach to Mining Operation Key Concepts. 2021. Available online: <https://circulareconomyleaders.ca/wp-content/uploads/2022/01/Towards-a-Circular-Economy-Approach-to-Mining-Operations.pdf> (accessed on 1 October 2022).
- Mining & Metals in a SustainableWorld 2050: Industry Agenda. 2015. Available online: http://www3.weforum.org/docs/WEF_MM_Sustainable_World_2050_report_2015.pdf (accessed on 15 April 2022).
- Upadhyay, A.; Laing, T.; Kumar, V.; Dora, M. Exploring barriers and drivers to the implementation of circular economy practices in the mining industry. Resour. Policy 2021, 72, 102037. <http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102037>
- Bianchi, M.; Cordella, M. Does circular economy mitigate the extraction of natural resources? Empirical evidence based on analysis of 28 European economies over the past decade. Ecol. Econ. 2023, 203, 107607. <http://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107607>
- Preobrazovanie Nashego Mira: Povestka Dnya v Oblasti Ustojchivogo Razvitiya na Period do 2030 Goda. OON. 2015. Available online: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda> (accessed on 15 April 2022).
- Pakhomova, N.V.; Richter, K.K.; Vetrova, M.A. Transition to circular economy and closedloop supply chains as driver of sustainable development. St Petersburg Univ. J. Econ. Stud. 2017, 33, 244–268. <http://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2017.203>
- Governing Council of the United Nations Environment Programme. Reduce Reuse, and Recycle Concept (the 3Rs”) and Life-Cycle Economy. UNEP/GC.23/INF/11. 2005. Available online: wedocs.unep.org/rest/bitstreams/45276/retrieve (accessed on 15 April 2022).
- Rim, G.-N.; An, C.-J.; Jang, H.-S.; Jong, C.-S. A Study on the Types of the Circular Economy. 2022. Available online: <https://www.researchsquare.com/article/rs-2000438/v1> (accessed on 1 October 2022). <http://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2000438/v1>

15. Potting, J.; Hekkert, M.; Worrell, E. Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. Policy Report. 2017. Available online: https://www.researchgate.net/publication/319314335_Circular_Economy_Measuring_innovation_in_the_product_chain (accessed on 15 April 2022).
16. Gur'eva, M.A. Teoreticheskie osnovy koncepta cirkulyarnoy ekonomiki. Ekon. Otnos. 2019, 9, 2311–2335.
17. Litvinenko, V.; Bowbrink, I.; Naumov, I.; Zaitseva, Z. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals. J. Clean. Prod. 2022, 338, 130530. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130530>
18. Nedosekin, A.O.; Reishahrit, E.I.; Kozlovsky, A.N. Strategic approach to assessing the economic sustainability of objects of the mineral resource complex in Russia. Zap. Gorn. Inst. 2019, 237, 354–360. <http://doi.org/10.31897/pmi.2019.3.354>
19. Bobylev, S.N.; Solov'eva, S.V. Cirkulyarnaya ekonomika i ee indikatory dlya Rossii. Mir. Novoj. Ekon. 2020, 14, 63–72. <http://doi.org/10.26794/2220-6469-2020-14-2-63-72>
20. Ratner, S.V. Cirkulyarnaya ekonomika: Teoreticheskie osnovy i prakticheskie prilozheniya v oblasti regional'noj ekonomiki i upravleniya. Innovacii 2018, 29–37.
21. Val'ko, D.V. Cirkulyarnaya Ekonomika: Ponyatijnyj Apparat i Diffuziya Konceptii v Otechestvennyh Issledova-Niyah. Ekon. i Ekol. Menedzhment 2019. Available online: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyarnaya-ekonomika-ponyatiynyy-apparat-idiffuziya-kontseptsii-v-otechestvennyh-issledovaniyah> (accessed on 15 April 2022).
22. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy; Ellen MacArthur Foundation: Cowes, UK, 2013. Available online: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf> (accessed on 15 April 2022).
23. MacArthur, E.; Waughray, D. Intelligent Assets: Unlocking the Circular Economy Potential. 2016. Available online: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Intelligent_Assets_080216.pdf (accessed on 15 April 2022).
24. Haas, W.; Krausmann, F.; Wiedenhofer, D.; Heinz, M. How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. J. Ind. Ecol. 2015, 19, 765–777. <http://doi.org/10.1111/jiec.12244>
25. Sauvé, S.; Bernard, S.; Sloan, P. Environmental sciences: Sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. Environ. Dev. 2016, 17, 48–56. <http://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002>
26. Blomsma, F.; Brennan, G. The emergence of circular economy: A new framing around prolonging resource productivity. J. Ind. Ecol. 2017, 21, 603–614. <http://doi.org/10.1111/jiec.12603>
27. Martin, G.; Paulo, S.; Nancy, B.; Erik, H. The Circular Economy—A new sustainability paradigm? J. Clean. Prod. 2017, 143, 757–768. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
28. Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resour. Conserv. Recycl. 2017, 127, 221–232. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
29. Alhawari, O.; Awan, U.; Bhutta, M.K.S.; Ülkü, M.A. Insights from Circular Economy Literature: A Review of Extant Definitions and Unravelling Paths to Future Research. Sustainability 2021, 13, 859. <http://doi.org/10.3390/su13020859>
30. Mochalova, L.A.; Sokolova, O.G. Upravlenie ekologichnost'yu predpriyatij mineral 'no-syr'evogo kompleksa pri realizacii koncepcii cirkulyarnoy ekonomiki. Izvestiya vuzov. Gorn. Zhurnal 2020, 75–86. <http://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-6-75-86>
31. Amir, S.; Salehi, N.; Roci, M.; Sweet, S.; Rashid, A. Towards circular economy: A guiding framework for circular supply chain implementation. Bus. Strat. Environ. 2022, 1–18. <http://doi.org/10.1002/bse.3264>
32. Marchamalo, J.; Sotelo, J.; Carrilho, D. ERA-MIN: A Decade since the Inception of the EU Led Effort to Support the International Raw Materials Research Community. Mater. Proc. 2021, 5, 110. <http://doi.org/10.3390/materproc2021005110>
33. Accenture. Mining New Value from the Circular Economy. 2019. Available online: https://www.accenture.com/_acnmedia/pdf-98/accenture-circular-economy-in-mining.pdf (accessed on 15 April 2022).
34. Geng, D.M.; Li, J.K.; Liu, J.X.; Song, X.L. System analysis of circular economy development in coal mining area. Adv. Mater. Res. 2012, 524–527, 2735–2740. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.524-527.2735>
35. Pauliuk, S.; Wang, T.; Muller, D.B. Moving toward the circular economy: The role of stocks in the Chinese steel cycle. Environ. Sci. Technol. 2012, 46, 148–154. <http://doi.org/10.1021/es201904c>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22091699>
36. Wang, P.; Jiang, Z.Y.; Geng, X.Y.; Hao, S.Y. Dynamic material flow analysis of steel resources in China based on circular economy theory. Adv. Mater. Res. 2013, 813, 64–71. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.813.64>
37. Kalmykovaa, Y.; Sadagopan, I.; Rosado, L. Circular economy—From review of theories and practices to development of implementation tools. Resour. Conserv. Recycl. 2018, 135, 190–201. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
38. Chanturia, V.A.; Shadrinova, I.V.; Gorlova, O.E. Innovative processes of deep and environmentally safe processing of technogenic raw materials in the conditions of new economic challenges. Sustain. Dev. Mt. Territ. 2021, 13, 224–237. <http://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-2-224-237>
39. Larichkin, F.D. Nauchnye Osnovy Ocenki Ekonomicheskoy Effektivnosti Kompleksnogo Ispol'zovaniya Mine-Ral'nogo Syr'ya; KNC RAN: Apatity, Russia, 2004; 252p.
40. Goncharova, L.I.; Larichkin, F.; Perein, V.N. Potential of Technogenic Mineral Raw Materials in Russia and the Issues of its Rational Use. Econ. Soc. Changes Facts Trends Forecast 2015, 5, 104–117. <http://doi.org/10.15838/esc/2015.5.41.7>
41. Cisternas, L.A.; Ordóñez, J.I.; Jeldres, R.I.; Serna-Guerrero, R. Toward the Implementation of Circular Economy Strategies: An Overview of the Current Situation in Mineral Processing. Miner. Process. Extr. Met. Rev. 2022, 43, 775–797. <http://doi.org/10.1080/08827508.2021.1946690>
42. Borja, W.; El Idrissi, H.E.B.; Mouiya, M.; Sbi, S.; Daafi, Y.; Tamraoui, Y.; Alami, J. Phosphate waste rocks recycling in ceramic wall tiles: Technical performances. Ceram. Int. 2022, 48, 30031–30040. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.272>
43. Masindi, V.; Foteinis, S.; Renforth, P.; Ndiritu, J.; Maree, J.P.; Tekere, M.; Chatzisyseon, E. Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review. Ecol. Eng. 2022, 183, 106740. <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106740>

44. Helser, J.; Perumal, P.; Cappuyns, V. Valorizing (cleaned) sulfidic mine waste as a resource for construction materials. *J. Environ. Manag.* 2022, 319, 115742. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115742>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35849929>
45. Phiri, T.C.; Singh, P.; Nikoloski, A.N. The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review—Part I. *Miner. Eng.* 2022, 180, 107474. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107474>
46. Okanigbe, D.O.; Popoola, A.P.; Popoola, O.M.; Moshokwa, P.M. Review on Hydrotalcite-Derived Material from Waste Metal Dust, a Solid Adsorbent for CO₂ Capture: Challenges and Opportunities in South African Coal-Fired Thermal Plant. *Miner. Met. Mater. Ser.* 2022, 2, 81–93. http://doi.org/10.1007/978-3-030-92559-8_9
47. Marín, O.A.; Kraslawski, A.; Cisternas, L.A. Estimating processing cost for the recovery of valuable elements from mine tailings using dimensional analysis. *Miner. Eng.* 2022, 184, 107629. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107629>
48. Yaqot, M.; Menezes, B.C.; Franzoi, R.E. Interplaying of industry 4.0 and circular economy in cyber-physical systems towards the mines of the future. *Comput. Aided Chem. Eng.* 2022, 51, 1609–1614. <http://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50269-1>
49. Zhao, Y.; Zang, L.; Li, Z.; Qin, J. Discussion on the model of mining circular economy. *Energy Procedia* 2012, 16, 438–443. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.071>
50. de la Torre de Palacios, L.; Espí Rodríguez, J.A. In mining, not everything is a circular economy: Case studies from recent mining projects in Iberia. *Resour. Policy* 2022, 78, 102798. <http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102798>
51. Vargas, J.P.; Muñoz Lagos, A.P.; Feriz Torres, J.G.; Kinney, I.S.; Pérez Cortés, S.; Hurtado, J.P. Achieving Circularity through Novel Product-Service Systems in the Mining Industry: An Opportunity for Circularity. *Sustainability* 2022, 14, 3614. <http://doi.org/10.3390/su14063614>
52. Hristova, T. Tracking of the battery materials of electric vehicles in the mining industry via a blockchain. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2022, 970, 012012. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012012>
53. Kalisz, S.; Kibort, K.; Mioduska, J.; Lieder, M.; Małachowska, A. Waste management in the mining industry of metals ores, coal, oil and natural gas—A review. *J. Environ. Manag.* 2022, 304, 114239. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114239>
54. Blinova, E.; Ponomarenko, T.; Knysh, V. Analyzing the Concept of Corporate Sustainability in the Context of Sustainable Business Development in the Mining Sector with Elements of Circular Economy. *Sustainability* 2022, 14, 8163. <http://doi.org/10.3390/su14138163>
55. Tayebi-Khorami, M.; Edraki, M.; Corder, G.; Golev, A. Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations. *Minerals* 2019, 9, 286. <http://doi.org/10.3390/min9050286>
56. Li, H.; Wei, X.; Gao, X. Objectives setting and instruments selection of circular economy policy in China's mining industry: A textual analysis. *Resour. Policy* 2021, 74, 102410. <http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102410>
57. Gedam, V.V.; Raut, R.D.; de Sousa Jabbour, A.B.L.; Agrawal, N. Moving the circular economy forward in the mining industry: Challenges to closed-loop in an emerging economy. *Resour. Policy* 2021, 74, 102279. <http://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102279>
58. Jonek-Kowalska, I.; Wolniak, R.; Marinina, O.; Ponomarenko, T. Stakeholders, Sustainable Development Policies and the Coal Mining Industry: Perspectives from Europe and the Commonwealth of Independent States; Routledge: London, UK, 2022; 256p. <http://doi.org/10.4324/9781003091110>
59. Boyko, N.A.; Chvileva, T.A.; Romasheva, N.V. The impact of coal companies on the socio-economic development of coal mining regions and its assessment. *Ugol'—Russ. Coal J.* 2019, 48–53. <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-11-48-53>
60. Vasilev, Y.N.; Tsvetkova, A.Y. GAP-analysis of the Russian Federation coal industry. *Rev. ESPACIOS* 2020, 41, 25–42.
61. Kazanin, O.I.; Yaroshenko, V.V. Decrease in coal losses during mining of contiguous seams in the near-bottom part at Vorkuta deposit. *J. Min. Inst.* 2020, 244, 395–401. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.4.1>
62. Zubov, V.P. Applied technologies and current problems of resource-saving in underground mining of stratified deposits. *Gorn. Zhurnal* 2018, 77–83. <http://doi.org/10.17580/gzh.2018.06.16>
63. Meshkov, A.A.; Kazanin, O.I.; Sidorenko, A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the kuzbass mines. *J. Min. Inst.* 2021, 249, 342–350. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.3>
64. Porvetsky, A.K. Choice of Rational Technology of Ore Mining. *Geomechanical Assessment of the State of the Subsoil. Use of Underground Space; Geocology, M., Ed.; MGGU: Moscow, Russia, 2003; 767p.*
65. Oparin, V.N.; Ordin, A.A.; Nikolsky, A.M. Negative consequences of random extraction of coal beds in Kuzbass. Expansion of Minerals and Raw Materials Base in Siberia. In *Proceedings of the All-Russian Forum with International Participation; Obruchev, V.A., Usov, M.A., Urvantsev, N.N., Eds.; TPU: Tomsk, Russia, 2013; pp. 622–626.*
66. Alab'ev, V.R.; Ashihmin, V.D.; Plaksienko, O.V.; Tishin, R.A. Prospects for industrial methane production in the mine n.a. V.M. Bazhanov using vertical surface wells. *J. Min. Inst.* 2020, 241, 3–9. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.3>
67. Blinova, E.S.; Nevskaya, M.A. Methane utilization as a resource-saving method in the coal industry. *E3S Web Conf.* 2021, 266, 06002. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202126606002>
68. BP. Statistical Review of World Energy [Электронный ресурс]—2017. Available online: https://www.bp.com/content/dam/bpcountry/de_ch/PDF/bpstatistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf (accessed on 15 April 2022).
69. Perspektivah Dobychi v Rossii Ugol'nogo Gaza. Available online: <https://www.gazprom.ru/about/production/extraction/metan/> (accessed on 15 April 2022).
70. Golicyn, M.V.; Vyalov, V.I.; Bogomolov, A.H.; Pronina, N.V.; Makarova, E.Y.U.; Mitronov, D.V.; Kuzevanova, E.V.; Makarov, D.V. Perspektiviy Razvitiya Tekhnologicheskogo Ispol'zovaniya Uglej Rossii. *Georesursy* 2015, 2, 41–53.
71. Makarov, E.Y.U.; Mitrofanov, D.V. Resursnaya Baza i Perspektivy Dobychi Metana Ugol'nyh Plastov v Rossii. *Georesursy* 2015, 2, 101–105.
72. Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines, 2nd ed.; ECE ENERGY SERIES No. 47; United Nations: Geneva, Switzerland, 2016; 108p, Available online: https://unece.org/DAM/energy/cmm/docs/BPG_2017.pdf (accessed on 1 October 2022).
73. Dzhiyeva, A.K.; Brigida, V.S. Spatial non-linearity of methane release dynamics in underground boreholes for sustainable mining. *J. Min. Inst.* 2020, 245, 522–530. <http://doi.org/10.31897/PMI.2020.5.3>

74. Vasilev, Y.; Cherepovitsyn, A.; Tsvetkova, A.; Komendantova, N. Promoting Public Awareness of Carbon Capture and Storage Technologies in the Russian Federation: A System of Educational Activities. *Energies* 2021, 14, 1408. <http://doi.org/10.3390/en14051408>
75. Parmuzin, P.N. Zarubezhnyj i Otechestvennyj Opyt Osvoeniya Resursov Metana Ugol'nyh Plastov; UGTU: Ukhta, Russia, 2017.
76. Verzhanskiy, A.P. Coal-fired generation greening. Excerpts from the roundtable report "On the Program of coal-fired generation in the Russian Federation". *Ugol'–Russ. Coal J.* 2017, 9, 11–16.
77. Encyclopedia of Technology. Evolution and Comparative Analysis of the Resource Efficiency of Industrial Technologies. FGAU "NII "CEPP". - M. Saint Petersburg. Renome. 2019. 824p. Available online: <http://ecoline.ru/wp-content/uploads/encyclopediaof-technologies.pdf> (accessed on 1 October 2022).
78. Sostoyanii i Ob Ohrane Okruzhayushchej Sredy Rossijskoj Federacii v 2020 Godu. Gosudarstvennyj Doklad.—M.: Minprirody Rossii; MGU Imeni M.V.Lomonosova. 2021. 1000p. Available online: <https://nangs.org/analytics/minprirodyrossii-gosudarstvennyj-doklad-o-sostoyanii-i-ob-okhrane-okruzhayushchej-sredy-rossijskoj-federatsii-v-2020-godu-proektsentyabr-2021-pdf> (accessed on 15 April 2022).
79. Rasporyazhenie Pravitel'stva Kemerovskoj Oblasti–Kuzbasa. 359-r «Ob Utverzhdenii Strategii Razvitiya Klastera «Kompleksnaya Pererabotka Uglya i Tekhnogennyh Othodov v Kemerovskoj Oblasti-Kuzbasse» do 2030 Goda». Available online: <https://bulleten-kuzbass.ru/bulletin/309694> (accessed on 15 April 2022).
80. Sarkar, B.; Debnath, A.; Chiu, A.S.; Ahmed, W. Circular economy-driven two-stage supply chain management for nullifying waste. *J. Clean. Prod.* 2022, 339, 130513. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130513>
81. Shestakova, I.G. To the question of the limits of progress: Is singularity possible? *Vestn. St. Petersburg Univ. Philos. Confl. Stud.* 2018, 34, 391–401. <http://doi.org/10.21638/11701/spbu17.2018.307>