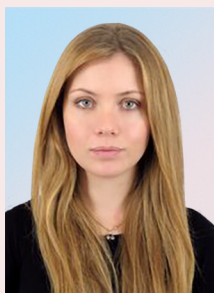


DOI: 10.15838/esc.2025.4.100.16

УДК 338.001.36, 330.15, ББК 65.011.3, 65.28

© Вегнер-Козлова Е.О.

Обзор методик оценки экономики замкнутого цикла



**Екатерина Олеговна
ВЕГНЕР-КОЗЛОВА**

Институт экономики УрО РАН
Екатеринбург, Российская Федерация
e-mail: vegner.kozlova.eo@uiec.ru

ORCID: 0000-0003-4182-6514; ResearcherID: N-5568-2016

Аннотация. Задачи перехода к экономике замкнутого цикла не теряют актуальности ввиду того, что данная концепция расширяет границы экологической устойчивости за счет идей преобразования продуктов и отходов в контексте задач эффективного взаимодействия безопасности экологических систем и стабильности экономического роста. Параллельно с возможностями экономики замкнутого цикла расширяются теоретико-методологические вопросы относительно оценки результативности ее практик. На данный момент не существует общепринятого способа измерения экономики замкнутого цикла ни в целом, ни на отдельных уровнях (макро-, мезо-, микро-), ни в рамках различных принципов (принципы «Р»). Цель работы – систематизировать предшествующие научные труды по тематике оценки экономики замкнутого цикла, провести их обзорный анализ. В статье применены общетеоретические методы анализа, синтеза, сравнения и классификации, что отвечает задачам описательного обзора. В качестве основного метода выбран вторичный анализ данных. Исследование позволило проследить тенденции, систематизировать подходы к оценке экономики замкнутого цикла и получить актуальное представление о динамике научного знания, касающегося методов ее оценки. Определены опорные точки для категоризации и структурирования показателей экономики замкнутого цикла, классифицированы подходы к ее измерению. В ходе обзора выявлен ряд методологических проблем: методики оценки должны базироваться на общепринятых определениях и принципах экономики замкнутого цикла, ее устоявшихся стратегиях и бизнес-моделях, а также соответствовать на-

Для цитирования: Вегнер-Козлова Е.О. (2025). Обзор методик оценки экономики замкнутого цикла // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. Т. 18. № 4. С. 285–302. DOI: 10.15838/esc.2025.4.100.16

For citation: Wegner-Kozlova E.O. (2025). An overview of closed-loop economy assessment methods. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 18(4), 285–302. DOI: 10.15838/esc.2025.4.100.16

циональным задачам и национальным стратегиям в области устойчивого развития и учитывать отраслевую и региональную специфику. Изученные в работе методы оценки систематизированы и классифицированы относительно уровня применения практик экономики замкнутого цикла (на микро-, мезо- и макроуровне), что может способствовать усилению результативной субъектности разноуровневых акторов в сфере реализации проектов экономики замкнутого цикла.

Ключевые слова: экономика замкнутого цикла, циркулярная экономика, методика оценки циркулярной экономики, показатели циркулярной экономики.

Благодарность

Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием для ФГБУН Институт экономики Уральского отделения РАН, тема № 0327-2024-0010 на 2024–2026 гг.

Введение

Идеи перехода от линейного типа производств к новым циклическим моделям не теряют актуальности, несмотря на геополитическую турбулентность, ввиду необходимости решения экзистенциальных задач по снижению негативного воздействия на окружающую среду. Экономика замкнутого цикла (далее – ЭЗЦ), она же в зарубежных источниках циркулярная экономика (далее – ЦЭ), в рамках логической модели «ресурсы – продукты – возобновляемые ресурсы» в общем виде предполагает два вектора развития: 1) минимизацию использования ресурсов и вторичную переработку; 2) экологизацию производств и снижение негативного воздействия на окружающую среду. С этих позиций ЭЗЦ расширяет границы экологической устойчивости за счет идей преобразования продуктов, отходов и производственных цепочек, таким образом, чтобы было найдено и реализовано эффективное взаимодействие между безопасностью экологических систем и стабильностью экономического развития. Однако параллельно с возможностями реализации ЭЗЦ расширяются теоретико-методологические вопросы относительно оценки результативности практик в рамках указанной концепции.

Барьерами для выработки единого подхода к измерению ЭЗЦ в настоящее время выступают:

1) дуализм в подходах к ЭЗЦ (минимизация потребления ресурсов / минимизация негативного воздействия на окружающую среду (НВОС));

2) применимость практик ЭЗЦ на различных уровнях:

3) микроуровень (продукты, компании, потребители);

4) мезоуровень (промышленный симбиоз, эко-промышленные парки, отрасли);

5) макроуровень (глобальная, национальная, региональная, городская экономические системы);

6) сущностное содержание и перечень принципов «Р» («R») в ЭЗЦ, к наиболее известным из которых относятся отказ (refuse), переосмотр (rethink), сокращение (reduce), повторное использование (reuse), ремонт (repair), модернизация (refurbish), реконструкция (remanufacture), перепрофилирование (repurpose), рециклинг (переработка, recycle), восстановление (recover);

7) различия методических подходов к оценке принципов «Р»;

8) сложность определения объекта измерения и различия в системах, рассматриваемых и измеряемых в рамках ЭЗЦ;

9) существенные отличия в биологических и искусственных циклах материалов и ресурсов, где биологические циклы связаны с безопасным и эффективным перемещением возобновляемых биотических ресурсов в биосферу и из нее, а искусственные (антропогенные) циклы предполагают применение искусственных материалов и их соединений, опасных для окружающей среды.

Указанные барьеры определяют основной дискуссионный вопрос: насколько существующие методики пригодны для оценки эколого-экономической эффективности стратегий ЭЗЦ в измеряемых системах. Следует также обратить внимание, что общепринятый подход отнесения региональных экономических

систем к мезоуровню при рассмотрении ЭЗЦ в зарубежных источниках меняется на макроуровень. Это дает возможность подчеркнуть уровень субъектности управляющих органов, отвечающих за реализацию данного направления в экономической системе объекта.

Уровень субъектности для реализации практик ЭЗЦ является существенным параметром, что связано с необходимостью учета для внедрения ЭЗЦ специфических территориальных особенностей (географических, экологических, экономических, социальных, институциональных). Особую актуальность ЭЗЦ приобретает для индустриальных регионов (с высокой долей добывающего и обрабатывающего секторов в структуре валового регионального продукта). Индустриальные регионы, являясь базисом развития национальной экономики, одновременно становятся лидерами деградации экологических систем. Для ряда таких регионов характерно экстенсивное индустриальное развитие, сопровождающееся внедрением технологий выщелачивания металлов, освоением глубоких горизонтов и месторождений с меньшим содержанием полезных ископаемых, что способствует обострению эколого-экономических противоречий. Преодолеть указанные проблемы можно только с позиции отражения субъектности, что необходимо учесть на стадии оценки ЭЗЦ. Настоящая обзорная работа ставит цель объединить и систематизировать накопленные знания в области оценки экономики замкнутого цикла, классифицировав существующие методики по уровням реализации ЭЗЦ.

Методы

Поставленная цель — синтезировать и систематизировать предшествующие исследования по тематике оценки экономики замкнутого цикла — предполагает применение общетеоретических методов анализа, синтеза, сравнения и классификации, что отвечает задачам описательного обзора. В качестве основного метода исследования выбран вторичный анализ данных, основная цель которого — поиск закономерностей, систематизация и классификация изучаемых объектов, методов или параметров. Выбранный метод исследования позволяет решить ряд методических задач: сравнить результаты предшествующих исследований, посвящённых оценке ЭЗЦ; получить представление о временной динамике исследований;

провести сравнительный анализ существующих подходов к оценке ЭЗЦ и предложить их классификацию. Поиск источников по циркулярной экономике (экономике замкнутого цикла) осуществлялся в базах и информационных ресурсах Web of Science, Google Scholar, ResearchGate, ScienceDirect с использованием различных комбинаций поисковых запросов, таких как «оценка циркулярной экономики», «индекс циркулярной экономики», «измерение циркулярной экономики», «индикаторы циркулярной экономики» по категориям «обзорная статья» и «исследовательская статья». При отборе использовался фильтр «открытый доступ». Предметная область была ограничена экономическими науками, менеджментом, науками об окружающей среде и социальными науками. В общей сложности в результате анализа получено 43 показателя, которые были включены в научный обзор и систематизированы в зависимости от уровня оценки на микро-, мезо-, макропоказатели. Результаты поиска отобраны вручную на основе названий и аннотаций. Значимыми критериями отбора стали такие понятия, как «анализ», «оценка» и аналогичные выражения, которые указывали на потенциальное измерение одного аспекта или подмножества аспектов в рамках циркулярной экономики.

Результаты

Изученные методы оценки ЭЗЦ систематизированы относительно уровня применения данных практик (микро-, мезо- и макроуровень), что может способствовать усилению результативной субъектности разноуровневых акторов в сфере развития практик и реализации проектов ЭЗЦ.

Макроуровень в настоящее время представлен наименьшим числом исследовательских работ, т. к. практики ЭЗЦ находятся на ранней стадии развития, что, соответственно, предполагает их апробацию в первую очередь на микро- и мезоуровне. Параметры оценки ЭЗЦ на макроуровне предложены в сборнике «Показатели “зеленого роста”» Организации экономического сотрудничества и развития¹, где подчеркивается роль производства и потребления в экономике, а также связь между экономи-

¹ Green Growth Indicators 2014. OECD. URL: https://www.oecd.org/en/publications/green-growth-indicators-2013_9789264202030-en.html

кой, природными ресурсами и экологической политикой. Особо отмечается, что повышение производительности ресурсов и обеспечение устойчивого управления материалами требуют комплексной политики в отношении отходов, материалов и продукции, основанной на экономике замкнутого цикла «3R». Экологическая и ресурсосберегающая эффективность экономики оценивается через показатели углеродной и энергетической продуктивности, которая характеризует взаимодействие с климатической системой и глобальным углеродным циклом, а также эколого-экономической эффективности использования энергетических ресурсов в производстве и потреблении; производительности природных ресурсов, которая характеризует экологическую и экономическую эффективность их использования в производстве и потреблении; многофакторной производительности, учитывающей экологические параметры через затраты, связанные с загрязнением окружающей среды.

В работе Y. Qing и соавторов предложена индексная система, используемая для оценки развития экономики замкнутого цикла в провинции Шэньси, включающая пять параметров (Qing et al., 2011).

В статье M. Haupt, C. Vadenbo, S. Hellweg представлен анализ материальных потоков швейцарской системы обращения с отходами, особое внимание уделяется физическому составу отходов. Половина твердых бытовых отходов перерабатывается, а половина термически обрабатывается с рекуперацией энергии. В качестве мерил ЭЗЦ предлагается применять коэффициент вторичной переработки, характеризующий поведение материалов в процессе обращения. Исследование посвящено вторичной переработке твердых бытовых отходов (бумаги, картона, алюминия, жести, стекла и полиэтилентерефталата) путем разделения на коэффициенты сбора в модели ЭЗЦ и модели без замкнутых циклов. Согласно предлагаемой методике, коэффициент измеряет доступные вторичные ресурсы, полученные в результате процессов переработки (Haupt et al., 2016).

M. Smol с соавторами (Smol et al., 2017) предложены показатели, характеризующие экономику замкнутого цикла в региональной политике. Авторы обращают внимание на вза-

имосвязь ЭЗЦ с эко-инновациями, что предполагает отражение этого аспекта в методике оценки. В работе представлены пять групповых показателей, основанных на факторах эко-инноваций, которые можно выявить из статистических данных Евростата. Такой способ измерения позволяет создать системный и интегрированный подход к концепции на региональном уровне через призму результативности эко-инноваций, учитывая статистическую специфику национальных экономических систем.

N. Kiani Mavi, R. Kiani Mavi оценивают экономику замкнутого цикла на макроуровне при помощи индекса Малмквиста (Kiani Mavi, Kiani Mavi, 2019).

A. Pires и G. Martinho разработали индекс иерархии отходов (WHI) для измерения иерархии твердых коммунальных отходов в контексте экономики замкнутого цикла. Переработка и подготовка к повторному использованию, в контексте нормативно-правовых источников Евростата, рассматриваются как позитивные факторы экономики замкнутого цикла, а сжигание и захоронение отходов — как негативные факторы. Авторы апробируют WHI на местном и национальном уровнях. Индекс позволяет рассчитать иерархию отходов с учетом различных типов переработки и сжигания, этим процессам присваиваются различные веса в зависимости от того, каким образом операции с отходами соответствуют экономике замкнутого цикла (Pires, Martinho, 2019). Применение WHI возможно для конкретных материалов и потоков отходов. Однако WHI рассматривает только операции, которые происходят после образования отходов, и не включает меры по предотвращению их образования. Возможность применения предложенной методики оценки ЭЗЦ напрямую зависит от национальной нормативно-правовой базы, определяющей сущность указанных процессов.

В работе I.-M. Garcia-Sanchez и соавторов описан многовариантный индекс, представляющий собой двухэтапный сводный бизнес-индекс экономики замкнутого цикла. Использование выборки, включающей 26 783 компаний из 49 стран и 10 секторов за период 2014–2019 гг., позволило обобщить инициативы на страновом и отраслевом уровнях. Индекс ос-

новывается на анализе данных базы Thompson Reuters EIKON², в связи с чем его расчет и достоверность оценки напрямую зависят от степени раскрытия нефинансовой информации (Garcia-Sanchez et al., 2021).

Для оценки ЭЗЦ на макроуровне применяются инструменты статистического анализа — индексный метод — и анализа относительных показателей (табл. 1). Это обусловлено простотой расчетов и возможностью выбора изучаемых параметров, что, в свою очередь, позволяет адаптировать методики для использования любого доступного набора официальных статистических данных. Индекс Малмквиста добавляет

возможности оценки динамических показателей производительности, позволяя дифференцировать параметры изменения производительности, связанные с циклическими процессами. Необходимость применения анализа материальных потоков зависит от сущности исследуемого циклического процесса, его параметров и его экономической целесообразности. Анализ материальных потоков дает возможность оптимизировать производственные процессы, что, соответственно, приводит к снижению затрат, но требует значительных ресурсов и предполагает сложности в интеграции с существующими системами.

Таблица 1. Методика оценки экономики замкнутого цикла на макроуровне

Автор(ы)	Год	Методический инструментарий	Оцениваемые показатели / параметры / описание
Qing Y., Qiongqiong G., Mingyue Ch.	2011	Индексный метод	- Социальное и экономическое развитие, - эффективность использования ресурсов, - переработка и повторное использование ресурсов, - защита окружающей среды, - сокращение загрязнения
Haupt M., Vadenbo C., Hellweg S.	2016	Анализ материальных потоков	Коэффициент вторичной переработки (RRs, Recycling rates)
Smol M., Kulczycka J., Avdiushchenko A.	2017	Относительные статистические показатели	- Эко-инновационные затраты, - эко-инновационная деятельность, - эко-инновационные результаты, - результаты ресурсоэффективности, - социально-экономические результаты
Kiani Mavi N., Kiani Mavi R.	2019	Индекс Малмквиста	- Уровень производительности ресурсов, потребление энергии, - выбросы парниковых газов, - объем отходов, - возобновляемые источники энергии, - ВВП
Pires A., Martinho G.	2019	Относительные статистические показатели	Индекс иерархии отходов (WHI) для твердых бытовых отходов использует следующие параметры: «PR» — подготовка к повторному использованию; «UpR» — переработка, предполагающая, что полученный продукт имел большую ценность, чем исходный элемент; «DR» — переработка предполагающая, что полученный продукт имел меньшую ценность, чем исходный элемент; «CAD» — компостирование и анаэробное сбраживание; «BT» — биологическая обработка смешанных/остаточных твердых бытовых отходов; «WtE» — сжигание с рекуперацией энергии; «I» — сжигание без рекуперации энергии; «L» — свалка
Garcia-Sanchez I.-M., Somohano-Rodriguez F.-M., Amor-Esteban V., Frias-Aceituno J.-V.	2021	Статистические методы	CEBIX (Circular Economy Business Index at the national level) — сводный бизнес-индекс экономики замкнутого цикла, основанный на 17 экологических практиках
Источник: составлено автором.			

² URL: <https://eikon.thomsonreuters.com/index.html>

Методический инструментарий оценки ЭЗЦ на мезоуровне более разнообразен. Например, работа N.B. Jacobsen посвящена количественной оценке результативности промышленного симбиоза, рассматриваемого как подотрасль промышленной экологии. Установлено, что с помощью промышленного симбиоза можно получить как существенные, так и незначительные экологические выгоды (Jacobsen, 2006).

Методика, представленная Z. Wen, X. Meng, базируется на предположении, что усиление материального обмена между объединенными предприятиями в ведущих промышленных производственных цепочках в экопромышленных парках приводит к созданию системы промышленного симбиоза, которая эффективна для укрепления экономики замкнутого цикла (Wen, Meng, 2015).

Индекс циркулярности сточных вод предложен в работе В. Kayal и соавторов для измерения цикличности в отрасли очистки сточных вод. Индекс отражает эффективность повторного использования и рециркуляции процесса очистки сточных вод, учитывая их специфические параметры. В рамках этой модели сточные воды превращаются из отходов в ресурс. Новизна предлагаемого индекса заключается в использовании объективно обоснованных весов, отражающих экологические преимущества процесса очистки (Kayal et al., 2019).

L.-I. Ding и коллеги предложили авторский подход, базирующийся на следующей гипотезе: промышленная ЭЗЦ стремится максимизировать экономические выгоды при минимизации негативного воздействия на окружающую среду путем восстановления производства, утилизации, эффективного обращения с отходами и использования возобновляемых источников. Используя анализ среды функционирования, авторы определяют эффективность промышленной циркулярной экономики. Расширенный индекс Мальмквиста используется для дальнейшего анализа динамических изменений. Экономический результат представлен добавленной стоимостью промышленной отрасли (IAVS), которая от-

ражает конечный продукт деятельности промышленного производства в денежной форме. Авторы, отталкиваясь от доступности статистических данных, учитывают при оценке промышленную рабочую силу и основной капитал в качестве экономических затрат. Нежелательным результатом в модели является промышленное загрязнение, которое оценивается по параметрам объема промышленных сточных вод и твердых промышленных отходов. Затраты на экологическое управление в основном состоят из затрат на очистку промышленных сточных вод, очистные сооружения сточных вод, инвестиции в управление окружающей средой в связи с промышленным загрязнением. Показателями результатов очистки окружающей среды стали объемы очищенных промышленных сточных вод и утилизации твердых промышленных отходов (Ding et al., 2020).

С.В. Ратнер, В.В. Иосифов, П.Д. Ратнер (Ратнер и др., 2020) предложили подход к оценке уровня развития ЦЭ для регионального и федерального уровней. К первой подсистеме циркулярной экономики (SS1) отнесена производственная подсистема, оптимизация деятельности которой заключается в снижении ресурсоемкости. За положительный результат деятельности региональной экономической системы взят объем ВРП Y_1 , как положительный результат деятельности коммунальной инфраструктуры — количество населения в регионе, проживание которого обеспечивается данной инфраструктурой Y_2 . Как входы производственной подсистемы рассматриваются физические ресурсы, которые она потребляет: объем потребляемой регионом энергии X_1 и объем потребляемой воды X_2 . В качестве нежелательных выходов выбраны объем выбросов в атмосферу от стационарных источников Z_1 , объем неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод Z_2 , объем образования отходов производства и потребления Z_3 и площадь нарушенных земель Z_4 .

В работе С.С. Гутмана, М.С. Манаховой предложены три группы целей при реализации ЦЭ на уровне региона (табл. 2).

Статья С.-Н. Wang и коллег посвящена оценке поставщиков для реализации экономики замкнутого цикла. Индекс учитывает экономические, экологические и социальные потери, связанные с низким качеством продукции. В контексте экономики замкнутого цикла низкое качество приводит к увеличению количества брака, сокращению срока службы изделия и уменьшению возможности повторного использования компонентов (Wang et al., 2021).

Еще одна отраслевая методика оценки (для строительной отрасли) элементов ЭЗЦ предложена в работе Т. О'Grady и соавторов. Предлагаемый индекс оценивается через параметры проектирования сноса, демонтажа и устойчивости в строительстве. Индексация цикличности зданий, по мнению авторов, должна способствовать переходу от традиционного сноса к экономике замкнутого цикла и снижению воздействия на окружающую среду на этапах реконструкции. Исследователи отмечают, что возможность применения методики варьируется в зависимости от нормативно-правовой базы, регулирующей процессы утилизации и повторного использования отходов. Индекс изменяется в границах от 0 до 1, где более высокое значение указывает на то, что здание обладает высокой

степенью демонтажа и построено с использованием устойчивых компонентов, которые можно разбирать несколько раз (O'Grady et al., 2021).

Н.Ю. Титовой предложена система циркулярной экономики в соответствии с целями устойчивого развития, основанная на библиометрическом анализе 679 публикаций. Показатели, используемые в данных исследованиях, распределены по группам (экономические, экологические, социальные), в результате чего установлено соответствие между ними по признакам принадлежности к оценке достижения целей устойчивого развития ООН и принципам циркулярной экономики (Титова, 2022).

Т.Т. Huyn Do и соавторами рассмотрен интегрированный циклический индекс для оценки потенциальной эффективности применения ЭЗЦ в цепочке производства древесины с учетом углеродной нейтральности. Предложенный индекс отражает пять параметров ЭЗЦ и нулевые выбросы углерода. Метод наилучшего-наихудшего использовался для расчета оптимальных весовых коэффициентов компонентов индекса, а линейное целевое программирование — для выявления максимального значения в целях определения предпочтительных альтернатив ЭЗЦ (Huyn Do et al., 2023).

Таблица 2. Цели циркулярной экономики на региональном уровне

Сфера	Цели
Социальная сфера	Создание новых рабочих мест и увеличение числа практикантов от вузов на предприятиях, придерживающихся принципов ЦЭ, за счет поддержки со стороны администрации регионов (как показатель перспективы трудоустройства населения). Создание экопарков, заповедников, экотроп. Поддержка научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в регионе. Развитие благоустройства жилых кварталов с учетом экологических норм и пунктов для приема мусора. Агитация населения к раздельной сортировке мусора и организация общественных мероприятий на эту тематику.
Экологическая сфера	Обеспечение контроля над загрязнением воздуха, водоемов и почв промышленными объектами. Организация инфраструктуры для раздельной сортировки отходов в жилых комплексах и на производственных объектах. Повышение контроля над организацией незаконных свалок. Повышение доли перерабатываемых в регионе отходов. Введение более жестких экологических нормативов. Уменьшение доли использования первичных ресурсов. Снижение незаконной вырубki лесов на территории региона.
Экономическая сфера	Поддержка развития и создания промышленных кластеров. Финансирование со стороны администрации НИОКР. Создание рынка вторичных ресурсов. Повышение тарифов на первичные природные ресурсы. Увеличение штрафов за экологические нарушения. Повышение экономической устойчивости предприятий региона.
Составлено по: (Гутман, Манахова, 2021).	

F. Holly, C. Schild, S. Schlund предлагают оценочную модель C-METRIC для измерения цикличности работы машиностроительных компаний, включающую 66 вопросов из 33 различных сфер деятельности (Holly et al., 2023).

В работе A.G. de Andrade Monteiro и его коллег описан показатель оценки ЦЭ для отрасли химической промышленности. Область применения показателей в сочетании с техническими циклами основывалась на принципах ЗР в сочетании с измерениями показателей образования отходов, выбросов газов и потребления энергии (Monteiro et al., 2024).

Оценка ЭЗЦ на мезоуровне более разнообразна по методическому инструментарию (табл. 3). Вероятно, это связано с большей доступностью исходных статистических данных для этого уровня, требующихся для применения большей части указанных методических инструментов. Кроме того, в отличие от инструментов макроуровня, на мезоуровне очевидна возможность использования качественного анализа (анкетирование, опрос). С нашей точки зрения, инструменты качественного анализа целесообразны на мезоуровне в большей степени, чем на макро- и микроуровне, в связи с тем что на мезоуровне возможно сформировать выборку или фокус-группу, отвечающую необходимым требованиям для обеспечения валидности исследования: с одной стороны, за счет качественного подбора участников и применения требований гомогенности социальных и профессиональных характеристик респондентов, с другой стороны, мезоуровень оставляет возможность сохранения принципа закона больших чисел.

Наиболее распространенную группу в настоящее время представляют методики оценки параметров экономики замкнутого цикла на микроуровне. Например, в работе S.K. Das и соавторов предложена многофакторная модель для расчета показателя трудоемкости демонтажа, отражающая общие эксплуатационные затраты на разборку изделия (Das et al., 2000).

P. Zwolinski и коллеги предложили учет ограничений, основанный на профилях восстанавливаемых продуктов, на протяжении всего процесса проектирования. Для определения профиля продукта предложены восемь категорий критериев (Zwolinski et al., 2006).

Исследование J.Y. Park, M.R. Chertow развивает инструменты обращения с отходами как с ресурсами. Авторами предложен количественный инструмент, который определяет, насколько ресурсоемки конкретные материалы. Индикатор потенциала повторного использования описывает, насколько материал ресурсоемок за счет качества (Park, Chertow, 2014).

Индекс окончания срока службы позволяет разработчикам принимать обоснованные решения об альтернативах проектирования для обеспечения оптимальных эксплуатационных характеристик изделия в конце срока службы (Lee et al., 2014).

В работе S. Huysman и его коллег предложен коэффициент для расчета экологического эффекта с точки зрения использования ресурсов. Применяется подход кумулятивного извлечения эксергии из природной среды. Показатель основан на оценочных значениях воздействия на окружающую среду, полученных с помощью методов оценки жизненного цикла (Huysman et al., 2015).

A. Van Schaik, M.A. Reuter разработали индекс вторичной переработки, основанный на имитационных моделях, который включает в себя показатели утилизации отходов (Van Schaik, Reuter, 2016).

В статье A.E. Scheepens и соавторов предложен коэффициент экологически эффективного создания ценности. Для оценки потенциально негативного воздействия бизнес-операций на окружающую среду был применен основанный на LCA коэффициент экзотрат (Scheepens et al., 2016).

E. Franklin-Johnson и соавторы для оценки ЭЗЦ используют показатель долговечности. Этот метод подразумевает оценку начального срока службы, срока службы после ремонта и срока службы после вторичной переработки для оценки вклада ресурса в долговечность материала. Оценка базируется на предположении, что центральным элементом экономики замкнутого цикла является создание ценности за счет сохранения материалов. Таким образом, измеряя вклад в сохранение материала на основе количества времени, в течение которого ресурс используется, можно получить оценку эффективности в экономике замкнутого цикла (Franklin-Johnson et al., 2016).

Таблица 3. Методика оценки экономики замкнутого цикла на мезоуровне

Автор(ы)	Год	Методический инструментарий	Оцениваемый показатель / параметр / описание
Jacobsen N.	2006	Статистические методы	Оценка результативности промышленного симбиоза
Wen Z., Meng X.	2015	Анализ потока вещества (Substance flow analysis, SFA). Показатели производительности ресурсов (RP). Анкетирование и полевые исследования	Оценка влияния промышленного симбиоза на рост ЭЗЦ
Kayal B., Abu-Ghunmi D., Abu-Ghunmi L., Archenti A., Nicolescu M., Larkin C., Corbet S.	2019	Статистические методы, весовые коэффициенты	Индекс циркулярной экономики сточных вод (Wastewater circonomics Index). Показатели, составляющие индекс, основаны на принципах сокращения, повторного использования и рециркуляции (3R)
Ding L.-I., Lei L., Wanga L., Zhang L.-F.	2020	Индекс Малмквиста. Анализ среды функционирования (Data Envelopment Analysis, DEA). Производственная функция Кобба – Дугласа	Добавленная стоимость промышленной отрасли (IAVS)
Ратнер С.В., Иосифов В.В., Ратнер П.Д.	2020	Анализ среды функционирования (DEA)	Комплексный показатель уровня развития циркулярной экономики, рассчитанный как среднее арифметическое четырех показателей различных видов эффективности
Гутман С.С., Манахова М.С.	2021	Система сбалансированных показателей (balanced scorecard, BSC)	Цели при реализации ЦЭ на уровне региона
Wang C.-H.	2021	Индекс Тагути	Оценка поставщиков: учитывает экономические, экологические и социальные потери, связанные с низким качеством продукции
O'Grady T., Minunno R., Chong H.-Y., Morrison G. M.	2021	Статистические методы	В индекс включены параметры проектирования сноса, демонтажа и устойчивости в строительстве (3DR). Предлагаемый индекс базируется на определении субиндексов сноса (DI), демонтажа (DE) и устойчивости (R) конструкции
Титова Н.Ю.	2022	Библиометрический анализ	Система циркулярной экономики в соответствии с целями устойчивого развития
Huyen Do T.T., Ly T.B.T., Hoang N.T., Tran V.T.	2023	Методы наилучшего-наихудшего (BWM) и линейного целевого программирования (LGP)	Интегрированный циклический индекс экономики (ICEI). Коэффициенты, вошедшие в индекс: C1 – коэффициент сокращения выбросов углекислого газа (Rc); C2 – коэффициент замещения возобновляемого топлива (RF); C3 – коэффициент замещения электроэнергии возобновляемыми источниками (RE); C4 – коэффициент рекуперации тепловой энергии (RH); C5 – коэффициент экономической эффективности
Holly F., Schild C., Schlund S.	2023	Опрос	C-METRIC (Circular Manufacturing Evaluation and Rating for Industrial Circularity) – оценка циклического производства и рейтинг промышленной цикличности
de Andrade Monteiro A.G. et al.	2024	Концепция жизненного цикла, статистические методы	Показатели, вошедшие в модель: выбросы в атмосферу, сокращение количества отходов, % отходов, используемых для переработки, % отходов, используемых для выработки электроэнергии
Источник: составлено автором.			

Индекс вторичной переработки, предложенный M.A. Reuter, A.V. Schaik, учитывает новый переработанный материал. Методика оценки основана на постулате, что вторичная переработка является основой системы экономики замкнутого цикла (Reuter, Schaik, 2016).

В работе N. Adibi и соавторов предложен индикатор ресурсов, включающий в оценку воздействие на жизненный цикл через «критические параметры», такие как переработка отходов. Возможность вторичной переработки и критичность ресурсов являются частью многокритериального показателя. Глобальный индикатор ресурсов оценивает все виды ресурсов, включая возобновляемые и невозобновляемые, посредством скорости регенерации (Adibi et al., 2017).

С помощью показателя цикличности на уровне продукта оцениваются затраты в цепочке создания стоимости. Используется показатель цикличности отношения рециркулируемой экономической ценности к общей стоимости продукта. В основе работы лежит гипотеза о том, что экономическая ценность компонентов продукта представляет собой основу для агрегирования (Linder et al., 2017).

Оценка показателей окончания срока службы вместе с анализом предпочтительных путей демонтажа позволяет разработчикам контролировать устойчивость продукта с точки зрения экономической результативности и воздействия на окружающую среду (Favi et al., 2017). Индекс повторного использования учитывает возможность вторичного применения компонента в том же изделии или в аналогичных изделиях. Индекс восстановления оценивает возможность регенерации компонента на основе различных типов затрат и доходов, участвующих в цикле восстановления. Индекс вторичной переработки сравнивает разницу между затратами на производство первичных материалов и доходами, получаемыми в результате процесса вторичной переработки. В частности, он учитывает экономию энергии, получаемую в результате процесса переработки материала, и доходы от вторичного сырья. Индекс энергетической утилизации отходов (с рекуперацией энергии) определяет, могут ли конкретные комбинации материалов быть непосредственно сожжены для производства энергии.

S. Cayzer и соавторами разработан прототип индикаторов ЭЗЦ (CEIP). Подход имеет такие преимущества, как скорость, простота, легкость применения (Cayzer et al., 2017).

F. Di Maio и коллеги предлагают показатель для оценки эффективности деятельности участников цепочки поставок с точки зрения ресурсоэффективности и соответствия экономике замкнутого цикла, измеряя как ресурсоэффективность, так и ЭЗЦ с точки зрения рыночной стоимости «дефицитных» ресурсов. Цикличность определяется как процент стоимости истощенных ресурсов, включенных в услугу или продукт, который возвращается после истечения срока его службы (Di Maio et al., 2017).

Работа A.A. Mohamed Sultan и соавторов также посвящена определению приоритетности вторичной переработки продуктов с истекшим сроком годности в условиях экономики замкнутого цикла на основе индекса привлекательности вторичной переработки (Mohamed Sultan et al., 2017).

V. Veleva, G. Bodkin, S. Todorova предложили модель, которая включает показатели для измерения результатов циклических бизнес-стратегий, где вовлечение сотрудников рассматривается как важнейшая стратегия для выявления и внедрения инновационных подходов и инициатив в области устойчивого развития (Veleva et al., 2017).

В работе M.D. Bovea, V. Perez-Belis определены руководящие принципы проектирования в соответствии с принципами экономики замкнутого цикла (Bovea, Perez-Belis, 2018).

M. Ameli с соавторами представлена многокритериальная математическая модель, в рамках которой объединены две задачи — выбор альтернативы проектирования и определение варианта конца жизненного цикла. Для решения трех основных задач устойчивого развития (экономической, экологической и социальной) рассматриваются три цели: максимизация прибыли производителя, минимизация воздействия на окружающую среду и максимизация социального воздействия. Рассматриваются два ограничения для контроля коэффициентов рекуперации и рециркуляции, которые налагаются законодательными актами. Для формулирования и решения модели разрабатывается имитационно-оптимизационная модель (Ameli et al., 2019).

М. Niero, P.P Kalbar предложили методику оценки циркулярной экономики на уровне продукта, объединяющую различные типы показателей, основанных на цикличности материала, а именно оценке повторного использования материала и индикаторе цикличности материала, и характеризующих жизненный цикл (изменение климата, истощение абиотических ресурсов, окисление, твердые примеси и потребление воды). Выбор показателей обусловлен отраслевой спецификой рассматриваемого продукта (Niero, Kalbar, 2019).

Инструмент принятия многокритериальных решений предложили Y.A. Alamerew, D. Brissaud. Метод представляет собой оценку экономики замкнутого цикла (PR-MCDT) для стратегий утилизации продуктов с истекшим сроком годности. Уровень, обозначенный авторами для применения методики, — руководство высшего/среднего звена для принятия стратегических решений. Методика учитывает технические, экономические, экологические, деловые и социальные параметры (Alamerew, Brissaud, 2018).

М. Marconi, M. Germani, M. Mandolini, C. Favi оценивают эффективное время демонтажа промышленных изделий. Оно определяется с учетом фактического состояния изделия и его компонентов (деформации, ржавчины, износа) с использованием корректирующих коэффициентов (Marconi et al., 2019).

EDiM — показатель простоты демонтажа для определения требуемого на него времени на основе методики последовательности операций Мейнарда (Vanegas et al., 2018). В EDiM используется расчетный лист с учетом последовательности действий и базовой информации о продукте и специфике демонтажа, классифицированной на шесть групп.

Работа E. Lacovidou и соавторов посвящена оценке качества материалов, компонентов и продуктов на различных этапах жизненного цикла. Исследователями предложена типология, позволяющая различать свойства, способствующие или препятствующие их восстановлению, переоборудованию, ремонту и вторичной переработке, что дает промышленности инструмент для улучшения качества потоков отходов и, следовательно, увеличения ценности производимых вторичных ресурсов в целях достижения более высоких показателей переработки (Lacovidou et al., 2019).

L. Cong и коллеги предложили метод проектирования восстановления ценности продукта в конце использования. Гипотеза методики заключается в том, что экономическая целесообразность вторичной переработки продукта в конце его жизненного цикла в значительной степени зависит от проектирования (Cong et al., 2019).

Показатели устойчивости в ЭЗЦ представлены в работе E. Rossi и соавторов. Ими предложены группы показателей, сосредоточенных на трех параметрах устойчивости — экологическом, экономическом и социальном, применяемых в циклических бизнес-моделях для учета инноваций, привносимых циклической экономикой (Rossi et al., 2020).

Методики микроуровня (табл. 4) в основном сосредоточены на оценке эффективности проектирования с учетом срока службы, жизненного цикла и детализации процессов демонтажа, что предполагает их неуниверсальность и возможное использование только для конкретных производств, для которых они изначально разрабатывались.

Методики микроуровня в сравнении с макро- и мезоуровнем характеризуются усложнением математических моделей, что связано с большей доступностью исходных данных по объекту исследования. Наряду с потенциалом усложнения инструментария для учета всех обстоятельств функционирования системы как единого объекта необходимо большее количество факторов. Однако не все связи между компонентами систем могут быть количественно учтены из-за отсутствия требуемого объема информации, особенно для применения прогностического и имитационного моделирования.

Кроме того, на микроуровне возможно применение более сложных качественных инструментов анализа. В частности, метод анализа иерархий представляет собой процедуру для нахождения весовых коэффициентов факторов при анализе систем экспертным методом. Отдельно следует обратить внимание на активное использование оценки жизненного цикла (LCA) в инструментальном наборе оценки ЭЗЦ. Метод рассматривает все стадии жизненного цикла продукта, что позволяет выявить наиболее критичные этапы с точки зрения воздействия на окружающую среду и обеспечи-

Таблица 4. Методики оценки экономики замкнутого цикла на микроуровне

Автор(ы)	Год	Методический инструментарий	Оцениваемый показатель / параметр / описание
Das S.K., Yedlarajah P., Narendra R.	2000	Многофакторная математическая модель	Методика оценки операций по демонтажу для расчета показателя трудоемкости демонтажа (DEI)
Zwolinski P., Lopez-Ontiveros M.-A., Brissaud D.	2006	Статистические методы	Восстановление на протяжении всего процесса проектирования (Remanufacturing Product Profiles, REPRO)
Park J.Y., Chertow M.R.	2014	Статистические методы	Индикатор потенциала повторного использования (Reuse Potential Indicator, RPI)
Lee H.M., Lu W.F., Song B.	2014	Математические методы	Индекс окончания срока службы (End-of-Life Index)
Huysman S., Debaveye S., Schaubroeck T., De Meester S., Ardente F., Mathieux F., Dewulf J.	2015	Оценка жизненного цикла (LCA)	Коэффициент полезного использования при вторичной переработке
Van Schaik A., Reuter M.A.	2016	Имитационное моделирование	Индекс вторичной переработки (Recycling Indices, RI)
Scheepens A.E., Vogtlander J.G., Brezet J.C.	2016	Коэффициент экзотрат, основанный на LCA	Коэффициент экологически эффективного создания ценности (Eco-efficient Value Creation, EVR)
Franklin-Johnson E., Figge F., Canning L.	2016	Статистические методы	Коэффициент долговечности
Reuter M.A., Schaik A.V.	2016	Статистические методы	Индекс вторичной переработки (RI). Потенциал и эффективность переработки должны быть определены количественно для продуктов, систем сбора, технологий разделения и рекуперации отходов и поставок материалов
Adibi N., Lafhaj Z., Yehya M., Payet J.	2017	Оценка жизненного цикла (LCA)	Глобальный индикатор ресурсов
Linder M., Sarasini S., Van Loon P.	2017	Статистические методы	Показатель цикличности на уровне продукта
Di Maio F., Rem P.C., Balde K., Polder M.	2017	Оценка рыночной стоимости «дефицитных» ресурсов	Единый показатель эффективности использования ресурсов, основанный на ценности (VRE)
Mohamed Sultan A.A., Lou E., Mativenga P.T.	2017	Статистические методы	Индекс привлекательности (предпочтительности) вторичной переработки
Veleva V., Bodkin G., Todorova S.	2017	Статистические методы	Модель расширенной практики нулевых отходов
Favi C., Germani M., Luzzi A., Mandolini M., Marconi M.	2017	Индексный анализ	Оценка показателей окончания срока службы (EoL)
Cayzer S., Griffiths P., Beghetto V.	2017	Многомерный подход с единой агрегированной метрикой для каждого этапа жизненного цикла	Индикаторы ЭЗЦ (CEIP)
Ameli M., Mansour S., Ahmadi-Javid A.	2018	Математическое моделирование	Модель оптимизации для оценки устойчивости на стадии проектирования и определения альтернатив окончания жизненного цикла
Niero M., Kalbar P.P.	2018	Многокритериальный анализ решений (MCDA)	Показатели цикличности материалов и показатели жизненного цикла на уровне продукта

Окончание таблицы 4

Автор(ы)	Год	Методический инструментарий	Оцениваемый показатель / параметр / описание
Alamerew Y.A., Brissaud D.	2018	Метод принятия многокритериальных решений	Оценка экономики замкнутого цикла (PR-MCDT) для стратегий утилизации продуктов с истекшим сроком годности. Выбросы CO ₂ , выбросы SO ₂ , потребление энергии, чистая восстановленная стоимость, логистические затраты (стоимость сбора и транспортировки), стоимость утилизации продукта (сжигание, переработка, захоронение на свалке и т. д.), количество сотрудников, воздействие опасных веществ на сотрудников во время утилизации, стоимость демонтажа.
Marconi M., Germani M., Mandolini M., Favi C.	2018	Математические методы	Оценка эффективного времени демонтажа промышленных изделий
Vanegas P., Peeters J.R., Cattrysse D., Tecchio P., Ardente F., Mathieux F., Dewulf W., Duflo J.R.	2018	Техника определения последовательности операций Мейнарда (MOST)	Показатель простоты демонтажа eDiM
Bovea M.D., Perez-Belis V.	2018	Группировка статистических показателей	Методика, позволяющая проанализировать, насколько разработка и проектирование продукта соответствует параметрам экономики замкнутого цикла и какие принципы проектирования необходимо было бы включить, чтобы продукт соответствовал экономике замкнутого цикла.
Lacovidou E., Velenturf A.P.M., Purnell P.	2019	Оценка жизненного цикла (LCA)	Оценка качества на различных этапах жизненного цикла материалов, компонентов и продуктов (MCP)
Cong L., Zhao F., Sutherland J.W.	2019	Сценарный анализ, оценка анализ эффективности по Парето, аналитический иерархический процесс (АНП)	Показатель утилизации, основанный на стоимости, для измерения пригодности вторичной переработки и оценки конструктивных предложений по выбору материала
Rossi E., Bertassini A.C., Dos Santos Ferreira C., Do Amaral W.A.N., Ometto A.R.	2020	Группировка статистических показателей	Материальные (сокращение использования сырья, возобновляемость, возможность вторичной переработки, уменьшение содержания токсичных веществ, повторное использование, восстановление производства, количество восстановленных частей или компонентов продукта, долговечность продукта, структура и разнообразие заинтересованных сторон); экономические (финансовые результаты, налогообложение, инвестиционные инновации); социальные (создание рабочих мест, количество рабочих мест, созданных в рамках циклической бизнес-модели, доход, генерируемый рабочими местами, участие сотрудников в циклической модели, мышление клиента)
Источник: составлено автором.			

вает большую обоснованность решений при проектировании продукта, выборе материалов, технологий производства и способов утилизации. LCA требует сбора большого количества данных о различных этапах жизненного цикла. Некоторые этапы LCA связаны с субъективностью и зависят от применяемых критериев. С точки зрения эффективности управления человеческими ресурсами интерес представляет техника определения последовательности операций Мейнарда (MOST). В MOST выделяется 18 базовых элементов, которые обозначаются

буквами, например: A (Action distance) — движение по дистанции; B (Body motion) — движение корпуса тела; G (Gain control) — получение контроля над объектом, захват; P (Placement) — укладка объекта. Применение этой методики для оценки демонтажа объекта позволяет оптимизировать производственные процессы применительно к действиям в рамках ЭЗЦ. На наш взгляд, именно метод MOST особенно подчеркивает специфичность и неуниверсальность используемых в настоящий момент инструментов оценки параметров ЭЗЦ.

Многокритериальность представленных инструментов является одновременно преимуществом и недостатком. С одной стороны, методики позволяют учитывать несколько критериев, привлекать «человеческий фактор» при принятии решения (метод анализа иерархий), предполагают использование математического аппарата и программного обеспечения. Наряду с этим очевидны сложность выбора оптимального решения, потенциальный конфликт критериев, используемых для оценивания и сравнения альтернативных решений, трудоёмкость процесса формирования структуры модели, возможная противоречивость результатов, ограничения по количеству критериев и объектов.

Очевидно, что в дальнейшем перспективными станут комбинации методического инструментария. Тем не менее достижение консенсуса в этой области возможно только после окончательного формирования научной доктрины ЭЗЦ (ее сущностного понятия и принципов).

Обсуждение

Попытки систематизировать методические подходы к оценке ЭЗЦ и параметры оценки осуществлялись и ранее. Например, в работе J. Mesa и его коллег предлагается типизация подходов к оценке ЦЭ в контексте параметров устойчивого развития, а также представлены подходы, структурированные в зависимости от специфики проектирования, позволяющего адаптировать производственные процессы под цели ЭЗЦ — процессы замедления цикла и процессы замыкания цикла (Mesa et al., 2018). А. Parchomenko и соавторы применили множественный анализ соответствий для оценки 63 показателей и 24 характеристик ЦЭ, таких как эффективность переработки, долговечность и наличие на складе. Проведенный анализ позволил выявить три основных кластера показателей: эффективности использования ресурсов; запасов и потоков материалов; ориентированности на продукт. Также авторами разработана система визуализации показателей ЦЭ, позволяющая сравнивать отдельные показатели и интегрировать их в наиболее подходящие сочетания (Parchomenko et al., 2019). В исследовании H.S. Kristensen и M.A. Mosgaard рассматривается 30 показателей

ЭЗЦ на микроуровне. Они категоризованы на академические и практические и типизированы на три группы: отдельные количественные показатели; аналитические инструменты; составные. Авторами выделены девять категорий показателей ЦЭ: переработка, восстановление, повторное использование, демонтаж, продление срока службы, ресурсоэффективность, управление отходами, управление по истечении срока службы, многомерные показатели, не вошедшие в другие категории (Kristensen, Mosgaard, 2020). Набор показателей оценки ЭЗЦ для микроуровня, предложенный в работе E. Rossi и соавторов, позволил увидеть необходимость комплексного подхода и разработки многомерных индикаторов для измерения ЭЗЦ в контексте устойчивости, ввиду того что большинство показателей оценки ЦЭ сосредоточены на материальных потоках и стратегиях завершения жизненного цикла (Rossi et al., 2020). В работе V. Elia и коллег проанализированы и классифицированы методики, принятые для измерения воздействия на окружающую среду, в целях выявления возможности их использования для количественного измерения соответствия парадигме ЦЭ (Elia et al., 2017). Предложена таксономия методик для оценки ЭЗЦ, основанная на двух параметрах: индексах (синтетический показатель или совокупность показателей) и измерении материальных и энергетических потоков, ресурсопользования, потребления, параметров, основанных на жизненном цикле.

Таким образом, предложенная в нашей работе классификация дополняет научные знания в области систематизации методических подходов к оценке ЭЗЦ.

Заключение

В работе определены опорные точки для категоризации и структурирования показателей экономики замкнутого цикла, классифицированы подходы к ее измерению. Следует отметить, что измерение цикличности сопряжено со значительными трудностями, требующими разработки, применения и валидации методов оценки. На данный момент нет общепринятого способа измерения экономики замкнутого цикла ни в целом, ни на отдельных уровнях (макро-, мезо-, микро-), ни в рамках различных принципов ЭЗЦ (принципы «Р»).

Поставленная в работе цель не предполагала выявления достоинств или недостатков существующих методик, так как такая попытка носила бы субъективный характер. Методический инструментарий оценки ЭЗЦ обусловливается региональной и отраслевой спецификой, геополитическим фоном исследования и поставленными целями и задачами. Наряду с этим представленный методический обзор позволил определить ряд методических проблем: методика оценки ЭЗЦ должна включать общепринятые определения и принципы экономики замкнутого цикла и устоявшиеся стратегии и бизнес-модели замкнутого цик-

ла (в настоящее время эти вопросы носят дискуссионный характер); практическая реализация методического инструментария должна предполагать возможность оценки соответствия общим национальным задачам и национальным стратегиям в области устойчивого развития, а также учитывать отраслевую и региональную специфику. Несмотря на это, проведенное исследование позволит проследить тенденции и систематизировать методические подходы к оценке экономики замкнутого цикла и получить актуальное представление о динамике научного знания в этой области.

Литература

- Гутман С.С., Манахова М.С. (2021). Формирование системы индикаторов оценки реализации концепции циркулярной экономики в регионах Российской Федерации // Север и рынок: формирование экономического порядка. № 2. С. 81–95. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2021.72.007
- Ратнер С.В., Иосифов В.В., Ратнер П.Д. (2020). Анализ и оценка уровня развития циркулярной экономики в российских регионах // Экономический анализ: теория и практика. Т. 19. № 2. С. 206–225. DOI: 10.24891/ea.19.2.206
- Титова Н.Ю. (2022). Обзор методических подходов к оценке уровня устойчивого развития и циркулярной экономики // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. Т. 17. № 3. С. 288–303. DOI: 10.17072/1994-9960-2022-3-288-303
- Adibi N., Lafhaj Z., Yehya M., Payet J. (2017). Global Resource Indicator for life cycle impact assessment: Applied in wind turbine case study. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1517–1528. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.226
- Alamerew Y.A., Brissaud D. (2018). Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. *Journal of Remanufacturing*, 9(18-19), 169–185. DOI: 10.1007/s13243-018-0064-8
- Ameli M., Mansour S., Ahmadi-Javid A. (2019). A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 246–258. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.02.031
- Bovea M.D., Perez-Belis V. (2018) Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment. *Journal of Environmental Management*, 228, 483–494. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.014
- Cayzer S., Griffiths P., Beghetto V. (2017). Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10, 289–298. DOI: 10.1080/19397038.2017.1333543
- Cong L., Zhao F., Sutherland J.W. (2019). A design method to improve end-of-use product value recovery for circular economy. *Journal of Mechanical Design*, 141(4). DOI: 10.1115/1.4041574
- Das S.K., Yedlarijah P., Narendra R. (2000). An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost. *International Journal of Production Research*, 38(3). DOI: 10.1080/002075400189356
- De Andrade Monteiro A.G., Scur G., Mattos C.A., De Oliveira M.C. (2024) Circular economy in the Brazilian chemical industry: A proposal for a circularity index. *Cleaner Engineering and Technology*, 19(100730). DOI: 10.1016/j.clet.2024.100730
- Di Maio F., Rem P.C., Balde K., Polder M. (2017). Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 163–171. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.02.009
- Ding L.-I., Lei L., Wanga L., Zhang L.-F. (2020) Assessing industrial circular economy performance and its dynamic evolution: An extended Malmquist index based on cooperative game network DEA. *Science of The Total Environment*, 731. DOI: 10.1016/j.scitotenv.139001
- Elia V., Gnoni M.G., Tornese F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 142(4), 2741–2751. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.196

- Favi C., Germani M., Luzi A., Mandolini M., Marconi M. (2017). A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10(3), 136–146. DOI: 10.1080/19397038.2016.1270369
- Franklin-Johnson E., Figge F., Canning L. (2016). Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy Performance. *Journal of Cleaner Production*, 133, 589–598. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.023
- Garcia-Sanchez I.-M., Somohano-Rodriguez F.-M., Amor-Esteban V., Frias-Aceituno J.-V. (2021). Which region and which sector leads the circular economy? CEBIX, a multivariant index based on business actions. *Journal of Environmental Management*, 297, 113299. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113299
- Haupt M., Vadenbo C., Hellweg S. (2016). Do we have the right performance indicators for the circular economy? Insight into the Swiss waste management system. *Journal of Industrial Ecology*, 21. DOI: 10.1111/jiec.12506
- Holly F., Schild C., Schlund S. (2023). Development of an assessment model for measuring mechanical engineering companies' circularity and maturity levels. *Research Square*. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3391466/v1
- Huyen Do T.T., Ly T.B.T., Hoang N.T., Tran V.T. (2023). A new integrated circular economy index and a combined method for optimization of wood production chain considering carbon neutrality. *Chemosphere*, 311, Part 2. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137029
- Huysman S., Debaveye S., Schaubroeck T. et al. (2015). The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 53–60. DOI:10.1016/j.resconrec.2015.05.014
- Jacobsen N.B. (2006). Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*, 10(1-2), 239–255. DOI: 10.1162/108819806775545411
- Kayal B., Abu-Ghunmi D., Abu-Ghunmi L. et al. (2019). An economic index for measuring firm's circularity: The case of water industry. *Journal of Behavioral and Experimental Finance*, 21, 123–129. DOI: 10.1016/j.jbef.2018.11.007
- Kiani Mavi N., Kiani Mavi R. (2019). Energy and environmental efficiency of OECD countries in the context of the circular economy: Common weight analysis for Malmquist productivity index. *Journal of Environmental Management*, 247(2), 651–661. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.069
- Kristensen H.S., Mosgaard M.A. (2020). A review of micro level indicators for a circular economy e moving away from the three dimensions of sustainability? *Journal of Cleaner Production*, 243. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118531
- Lacovidou E., Velenturf A.P.M., Purnell P. (2019). Quality of resources: A typology for supporting transitions towards resource efficiency using the single-use plastic bottle as an example. *Science of The Total Environment*, 647, 441–448. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.344
- Lee H.M., Lu W.F., Song B. (2014). A framework for assessing product End-Of-Life performance: Reviewing the state of the art and proposing an innovative approach using an End-of-Life Index. *Journal of Cleaner Production*, 66, 355–371. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.11.001
- Linder M., Sarasini S., Van Loon P. (2017). A metric for quantifying product-level circularity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 471–795. DOI: 10.1111/jiec.12552
- Marconi M., Germani M., Mandolini M., Favi C. (2018). Applying data mining technique to disassembly sequence planning: a method to assess effective disassembly time of industrial products. *International Journal of Production Research*, 57(1), 1–25. DOI: 10.1080/00207543.2018.1472404
- Mesa J., Esparragoza I., Maury H. (2018). Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1429–1442. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.131
- Mohamed Sultan A.A., Lou E., Mativenga P.T. (2017). What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability. *Journal of Cleaner Production*, 154, 51–60. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.201
- Niero M., Kalbar P.P. (2019). Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 305–312. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.002
- O'Grady T., Minunno R., Chong H.-Y., Morrison G.M. (2021). Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 175. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105847
- Parchomenko A., Nelen D., Gillabel J., Rechberger H., Wien T. (2019). Measuring the circular economy – a Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. *Journal of Cleaner Production*, 210, 200–216. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.357

- Park J.Y., Chertow M.R. (2014). Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. *Journal of Environmental Management*, 137, 45–53. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.11.053
- Pires A., Martinho G. (2019). Waste hierarchy index for circular economy in waste management. *Waste Management*, 95, 298–305. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.014
- Qing Y., Qiongqiong G., Mingyue Ch. (2011). Study and integrative evaluation on the development of circular economy of Shaanxi Province. *Energy Procedia*, 5, 1568–1578. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.03.268
- Reuter M.A., Schaik A.V. (2016). Strategic metal recycling: Adaptive metallurgical processing infrastructure and technology are essential for a circular economy. *Annales des Mines – Responsabilite et environnement*, 82(62), 2–66. DOI: 10.3917/re1.082.0062
- Rossi E., Bertassini A.C., Dos Santos Ferreira C., Do Amaral W.A.N., Ometto A.R. (2020). Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electroelectronic cases. *Journal of Cleaner Production*, 247. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119137
- Scheepens A.E., Vogtlander J.G., Brezet J.C. (2016). Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyses and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable. *Journal of Cleaner Production*, 114, 257–268. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.075
- Smol M., Kulczycka J., Avdiushchenko A. (2017). Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 669–678. DOI: 10.1007/s10098-016-1323-8
- Van Schaik A., Reuter M.A. (2016). Recycling indices visualizing the performance of the circular economy. *World of Metallurgy – ERZMETALL*, 69(4/2016), 201–216.
- Vanegas P., Peeters J.R., Cattrysse D. et al. (2018). Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 323–334. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.022
- Veleva V., Bodkin G., Todorova S. (2017). The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen’s “zero waste” journey. *Journal of Cleaner Production*, 154, 517–529. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.177
- Wang C.-H., Helmi Ali M., Chen K.-S. et al. (2021). Data driven supplier selection as a circular economy enabler: A Taguchi capability index for manufactured products with asymmetric tolerances. *Advanced Engineering Informatics*, 47. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101249
- Wen Z., Meng X. (2015) Quantitative assessment of industrial symbiosis for the promotion of circular economy: A case study of the printed circuit boards industry in China’s Suzhou New District. *Journal of Cleaner Production*, 90, 211–219. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.03.041
- Zwolinski P., Lopez-Ontiveros M.-A., Brissaud D. (2006). Integrated design of remanufacturable products based on product profiles. *Journal of Cleaner Production*, 14(15-16), 1333–1345. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.11.028

Сведения об авторе

Екатерина Олеговна Вегнер-Козлова — кандидат экономических наук, доцент, Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, д. 29; e-mail: vegner.kozlova.eo@uiec.ru)

Wegner-Kozlova E.O.

An Overview of Closed-Loop Economy Assessment Methods

Abstract. The goals related to the transition to a closed-loop economy remain relevant due to the fact that this concept expands the boundaries of environmental sustainability through the ideas of transforming products and waste in the context of effective interaction between the safety of ecological systems and the stability of economic growth. Alongside the possibilities of the closed-loop economy, theoretical and methodological issues regarding the evaluation of the effectiveness of its practices are expanding. At present, there is no generally accepted way to measure a closed-loop economy as a whole, at individual levels (macro, meso, micro), or within the framework of various principles (“R”-strategies). The aim of the work is to systematize existing scientific research on the subject of closed-loop economy assessment,

and to conduct their overview analysis. The article uses general theoretical methods of analysis, synthesis, comparison and classification, which meets the objectives of a descriptive review. Secondary data analysis is chosen as the main method. The study made it possible to trace trends, systematize approaches to assessing the closed-loop economy and gain an up-to-date understanding of the dynamics of scientific knowledge regarding methods of its assessment. We define reference points for categorization and structuring of indicators of the closed-loop economy and classify approaches to its assessment. The review identified a number of methodological problems: assessment methods should be based on generally accepted definitions and principles of the closed-loop economy, its established strategies and business models, as well as comply with national objectives and national strategies in the field of sustainable development and take into account industry and regional specifics. The assessment methods studied in the work are systematized and classified relative to the level of application of closed-loop economics practices (at the micro, meso, and macro levels), which can help strengthen the effective subjectivity of multi-level actors in the implementation of closed-loop economy projects.

Key words: closed-loop economy, circular economy, methodology for assessing circular economy, circular economy indicators.

Information about the Author

Ekaterina O. Wegner-Kozlova – Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Institute of Economics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (29, Moskovskaya Street, Yekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: vegner.kozlova.eo@uiec.ru)

Статья поступила 24.03.2025.