

УДК 502.3

А.В. Киселев¹*Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия***Е.Р. Магарил²***Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДООЧИСТКИ В УСЛОВИЯХ ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКИ КАК ЭЛЕМЕНТ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме загрязнения водных объектов вследствие нерационального природопользования, рассматриваемой с точки зрения принципов экономики замкнутого цикла и обеспечения эколого-экономической безопасности территорий. В исследовательской работе решается ряд задач, в том числе систематизация существующих методических подходов к оценке эффективности водоочистки; разработка нового инструментария в составе политики эколого-экономической безопасности территорий, соответствующего принципам циркулярной экономики; апробация предложенного подхода на предмет соответствия хозяйственной деятельности предприятия по очистке сточных вод принципам экономики замкнутого цикла. В результате были получены наглядные и репрезентативные данные о соответствии технологического процесса водоочистки по трем различным сценариям для оценки эколого-экономической безопасности рассматриваемой территории. Результаты исследования являются достаточно простыми для интерпретации широким кругом заинтересованных лиц и могут быть использованы как элемент бенчмаркинга для пространственной отраслевой оценки или анализа динамичности конкретного субъекта хозяйственной деятельности. Предлагаемый инструментарий по оценке эффективности водоочистки с учетом принципов циркулярной экономики может быть использован как элемент публичной нефинансовой отчетности, например в рамках стандартов раскрытия информации в сфере водопроводно-канализационного хозяйства, а также в национальной системе бенчмаркинга. Проведение эталонного сравнения (бенчмаркинг) подразумевает процесс, направленный на поиск, оценку и трансфер наилучшего опыта ведения бизнеса и внедрения наилучших доступных технологий. Он позволяет определить сильные и слабые стороны предприятия, в том числе аспекты, нуждающиеся в оптимизации. Такая информация позволит обеспечить основным стейкхолдерам устойчивость, прозрачность и безопасность в долгосрочной перспективе: для инвесторов – понятные правила работы, для потребителей – высокое качество услуг по доступным ценам, органам государственной и муниципальной власти – обеспечение жителей инфраструктурой и решение модернизационных проблем.

Ключевые слова: устойчивое развитие; экономическая безопасность; водоочистка; циркулярная экономика; показатели эффективности; индекс циркулярности; бенчмаркинг.

1. Актуальность темы исследования

Дефицит водных ресурсов является одной из глобальных проблем современности для различных стран и наций по всему

миру, которая в ближайшие десятилетия может стать наиболее актуальным вопросом в экологической повестке дня [1]. В настоящее время более 2 миллиардов человек

живут в условиях ограниченного доступа к пресноводным ресурсам, а к 2050 году как минимум каждый четвертый человек в мире, вероятно, будет жить в области, страдающей от хронической или повторяющейся нехватки пресной воды [2].

Изменение климата и антропогенное загрязнение территорий поставили под угрозу ограниченные водные ресурсы. Отсутствие в ряде стран элементарных санитарно-гигиенических удобств, а также сброс недостаточно очищенных сточных вод со станций очистки сточных вод (СОСВ) приводят к накоплению большого количества органических и биогенных веществ, которые могут оказывать неблагоприятное воздействие на здоровье человека [3]. В результате происходит эвтрофикация поверхностных вод и прибрежных зон, которая, по существующим прогнозам, значительно возрастет почти на всех территориях в перспективе до 2030 года [4]. Безусловно, очистка сточных вод помогает значительно сократить загрязнение водных объектов, но такой процесс является энергозатратным и ведет к увеличению энергопотребления и соответствующим климатическим проблемам [5, 6]. Актуальные управленческие подходы в области водоочистки демонстрируют необходимость найти устойчивое и дружественное решение с экологической, экономической и энергетической точек зрения [7–9].

Устойчивый менеджмент в области водоочистки является глобальным вызовом,

направленным на сохранение пресноводных ресурсов и сокращения энергопотребления. По данным ЮНЕСКО, в настоящее время только 20 % образующихся по всему миру сточных вод проходит надлежащую водоочистку с образованием около 140 миллионов тонн осадков сточных вод по сухому веществу [10]. Последняя цифра была подсчитана путем аппроксимации данных из отчета EurObserv'ER [11] с пересчетом на общемировое население. Потребности в электрической энергии для процесса водоочистки составляют от 250 до 500 кВтч/млн·л очищенных сточных вод с перспективой роста на 44 % к 2030 году, в особенности для стран, не входящих в состав Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), где сточные воды в настоящее время подвергаются незначительной обработке или вообще не обрабатываются [10].

В настоящее время становится очевидным, что существующая модель работы СОСВ, основанная на линейной схеме экономики «возьми-сделай-утилизировать», больше не является устойчивой. Кроме того, утилизация отходов на полигонах размещения означает, что вся потенциальная энергия теряется [12, 13]. На сегодняшний день принятие практики циркулярной экономики представляется своевременным, актуальным и практическим вариантом для достижения целей устойчивого развития [14].

Циркулярная экономика – это стратегия устойчивого развития, которая предлагается для решения актуальных проблем деградации окружающей среды и дефицита ресурсов. Циркулярная экономика, основанная на принципах 3R по сокращению, повторному использованию и переработке материалов, четко определяет взаимозависимость между окружающей средой и экономикой [15]. Устойчивая система характеризуется также гораздо меньшим использо-

¹ Киселев Андрей Владимирович – аспирант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); e-mail: ipkiselyov@mail.ru.

² Магарил Елена Роменовна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой экономики природопользования Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19); e-mail: magari167@mail.ru.

ванием возобновляемых и невозобновляемых ресурсов, повторным использованием и переработкой материалов в замкнутом цикле, что приводит к значительному сокращению отходов [16].

СОСВ обладают большим потенциалом для совершенствования процессов водоочистки с целью сокращения недостаточно очищенных сточных вод и изъятия потенциальных ресурсов из отходов сточных вод, например питательные вещества (фосфор, азот), энергия и вода [17].

Одним из важнейших вопросов при внедрении принципов циркулярной экономики является порядок измерения ее эффективности, поскольку ее цели существенно отличаются от целей в традиционной линейной экономике³. Основная идея измерения «циркулярности» состоит в том, чтобы увидеть, как распределяются потоки материалов в экономике [18]. Система мониторинга должна быть нацелена на оценку прогресса внедрения циркулярной экономики в различных плоскостях на всех этапах жизненного цикла ресурсов, продуктов и услуг. Для оценки прогресса в достижении принципов циркулярной экономики и эффективности действий важно иметь набор надежных показателей [19]. СОСВ является критически важным элементом в политике внедрения принципов экономики замкнутого цикла, и для измерения степени «цикличности» необходим набор показателей.

Чем более сложный и интенсивный процесс очистки сточных вод, тем больше потребление энергии, поэтому целью настоящего исследования является предложение методического подхода к оценке эффективности водоочистки в соответствии с принципами циркулярной экономики для

обеспечения надлежащего качества сбрасываемых сточных вод при умеренном потреблении энергии. В данной работе предложен системный подход к измерению прогресса внедрения принципов экономики замкнутого цикла в работу СОСВ на основе 3R-принципов с использованием структур анализа жизненного цикла и анализа материальных потоков. Потоки материала и энергии являются ядром циркулярной экономики, поэтому предлагаемые показатели должны быть в состоянии охватить эти измерения [12, 13, 16].

2. Степень изученности проблемы

Разработке методических подходов к оценке степени «циркулярности» на микро- и макроуровнях посвящены работы таких авторов, как М. Березюк, Э. Буонкор, Й. Генг, С.Е. Гронлунд, С. Ди-Фрайя, Б. Каяль, Е.Р. Магарил, О.А. Малик, Э. Молина-Санчес, М. Моллинос-Сенанте, Л. Пинтер, Л. Пинтиль, Е. Рада, И. Рукавишникова, М. Сайдани.

Проведенный анализ литературы показывает, что большинство существующих исследований сосредоточено на создании системы оценки соответствия принципам экономики замкнутого цикла, с акцентом на повторном использовании и переработке. Применение принципов циркулярной экономики не ограничивается только повторным использованием или рециклингом, в первую очередь это совершенствование процессов и производств, направленных на сокращение образования отходов, ресурсо- и энергоэффективность, которые особенно актуальны для развивающихся стран. Поэтому принципы 3R должны быть приняты во внимание при разработке методов мониторинга СОСВ при оценке прогресса внедрения принципов экономики замкнутого цикла. Кроме того, предлагаемые в работах зарубежных и отечественных авторов показатели достаточно сложны для расчетов

³ EASAC policy report 2016, Indicators for circular economy. URL: https://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Circular_Economy/EASAC_Indicators_web_complete.pdf. (дата обращения: 29.11.2019).

и требуют доступа к значительному объему исходных данных.

3. Предлагаемые методы и подходы к исследованию

Разработанный авторами метод включает в себя следующие этапы: 1) описание области исследования; 2) разработка структуры мониторинга с использованием структур анализа жизненного цикла и анализа материальных потоков по принципу 3R; 3) определение набора показателей циркулярности для СОСВ; 4) разработка интегрального индекса циркулярности. При интерпретации результатов используется управленческий подход, который определяет крайние значения для всех показателей циркулярности – от 0 (что означает абсолютную линейность) до 1 (что означает абсолютную циркулярность).

3.1. Описание области исследования

В качестве рассматриваемых сценариев определены 3 типовых процесса водоочистки, основанные на функционировании централизованной системы водоотведения города Екатеринбурга (рис. 1). Город Екатеринбург является четвертым по величине городом в Российской Федерации с населением 1 468 833 человек⁴. Это административный центр Свердловской области, расположенный на границе Европы и Азии, крупнейший промышленный, образовательный, научный, туристический, торговый и финансовый центр, а также транспортно-логистический узел.

Централизованная система водоотведения города Екатеринбурга построена по бассейновому принципу: можно выделить две основные зоны канализации – северную и южную. Водоочистка из этих зон

проводится на Северной и Южной аэрационной станции соответственно. Южная СОСВ была спроектирована в 1970-х годах с максимальной проектной производительностью до 550 000 м³ в сутки, а северная СОСВ – с максимальной проектной производительностью до 100 000 м³ в сутки.

Первый сценарий, показанный на рис. 1, основан на технологическом процессе очистки сточных вод Южной СОСВ, который включает в себя первичную (механическую) и вторичную (биологическую) обработку с дезинфекцией хлором перед сбросом очищенных сточных вод. Обработка осадка сточных вод включает механическое обезвоживание с размещением осадка на полигонах захоронения. Эта станция работает без существенной модернизации с момента ее основания и имеет технически и морально устаревшие технологии.

Второй сценарий, показанный на рис. 1, основан на технологическом процессе очистки сточных вод Северной СОСВ, основные технологические операции водоочистки аналогичны Южной СОСВ, однако в 2018 году была завершена полная модернизация основной производственной линии, в которой были внедрены наилучшие доступные технологии (НДТ), включая фильтрацию на барабанных решетках, песколовки с аэрацией, аэротенки с нитрификацией и денитрификацией, УФ-обеззараживание перед сбросом очищенных сточных вод в объект-приемник. Обработка осадка сточных вод включает анаэробное сбраживание с образованием биогаза и механическое обезвоживание. Установка биогазовой мини-ТЭЦ (когенерационная установка) планируется к установке в ближайшее время.

Третий сценарий, показанный на рис. 1, повторяет технологический процесс второго сценария, однако дополнен планами будущей модернизации СОСВ, включая строительство цеха сушки осадка сточных вод и

⁴ Население Екатеринбурга // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Население_Екатеринбурга (дата обращения: 29.04.2019).

сжигание высушенного гранулированного осадка в цементной печи при производстве портландцементного клинкера.

3.2. Методический подход к разработке показателей циркулярности

Настоящее исследование было выполнено с использованием структур анализа жизненного цикла и анализа материальных потоков для создания базовой модели в соответствии с 3R-принципом экономики замкнутого цикла.

Анализ жизненного цикла относится к стандарту экологического менеджмента ISO 14000 и представляет из себя оценку воздействия рассматриваемого продукта на окружающую среду на протяжении всей его жизни. Цель такого анализа – сравнить

экологические характеристики продукции, чтобы иметь возможность выбрать наименее обременительные⁴. Все действия и процессы приводят к воздействию на окружающую среду вследствие потребления ресурсов, эмиссии веществ в окружающую среду и других экологических обменов [20]. Методика анализа жизненного цикла имеет пошаговую инструкцию по применению в соответствии с ISO 14040:2006, которая включает 4 этапа: 1) определение цели и области применения; 2) анализ запасов; 3) анализ воздействия и 4) интерпретация результатов.

⁵ ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment. URL: <https://www.iso.org/standard/37456.html> (дата обращения: 29.11.2019).

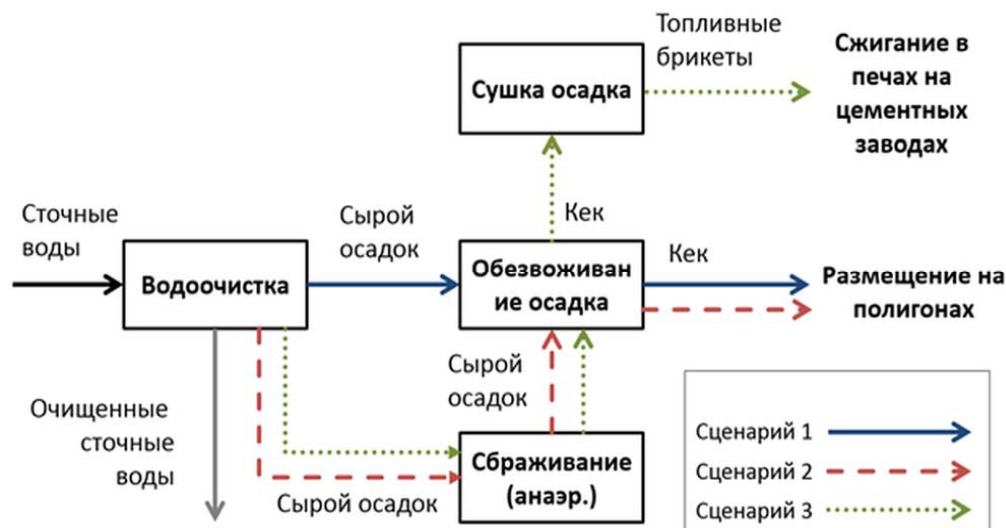


Рис. 1. Определение исследуемых сценариев: а – сценарий 1, основанный на технологическом процессе Южной СОСВ г. Екатеринбурга; б – сценарий 2, основанный на технологическом процессе Северной СОСВ г. Екатеринбурга; в – сценарий 3, основанный на наилучших доступных методах

Одним из основных подходов, используемых при разработке показателей циркулярности, является анализ, основанный на принципах и методах балансировки массы и анализа вход/выход [16]. Указанный инструмент представляет собой систему учета, которая фиксирует массовые балансы в экономике там, где входящие потоки массы равны исходящим, основанная на фундаментальных принципах, в частности законах термодинамики [21]. Основная идея применения состоит в том, чтобы определить и количественно оценить пути материалов/энергии в, через и из заранее определенных границ системы [22]. Это выражается в мониторинге материальных потоков с использованием физических единиц (веса) и их качественной оценки.

Акцент в данном исследовании ставится не на пошаговых действиях по применению

структур анализа жизненного цикла и анализа материальных потоков, а на использовании их в качестве основной матричной модели для построения индикаторов циркулярности. За основу такой модели была принята структура водоочистки на СОСВ [20], которая была незначительно доработана с применением метода балансировки масс и соответствует всем рассматриваемым сценариям (рис. 2).

Были определены основные потоки материалов: по входящему потоку – сточные воды, поступающие на СОСВ; по исходящему потоку – очищенные (сбрасываемые) сточные воды и осадок сточных вод. Дополнительно стоит выделить определение отдельного потока повторного использования осадка сточных вод как возможный вариант для СОСВ. Поток энергии также рассматривается в рассматриваемой структуре во-

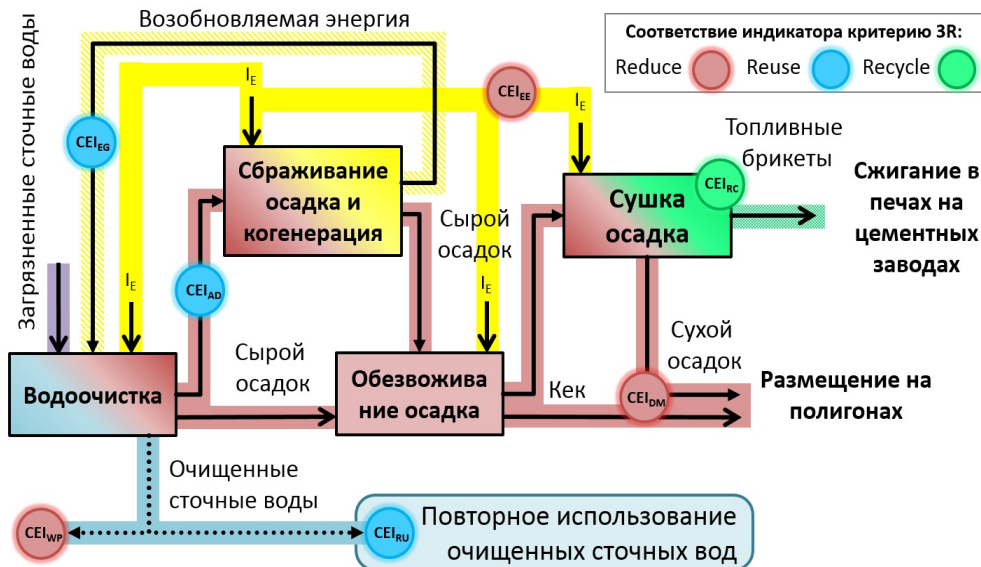


Рис. 2. Индикаторы циркулярности с учетом 3R-принципа; синяя линия – поток сточных вод; красная линия – поток осадков сточных вод; желтая линия – поток энергии; зеленая линия – поток повторного использования осадков сточных вод

доочистки, включая поступление энергии из сети и возобновляемую энергию от анаэробного сбраживания. Индикаторы циркулярности выводятся из рассматриваемой структуры (рис. 2) как контрольные точки на исходящем материальном потоке, что соответствует переходу к принципам экономики замкнутого цикла в 3R-категориях.

Совокупность показателей в рамках рассматриваемой структуры позволила определить матричный набор показателей циркулярности, который подразумевает наличие одного индикатора для каждой 3R-категории в разрезе определенных материальных/энергетических потоков, кроме потока повторного использования осадка сточных вод. Полученные 7 индикаторов циркулярности составляют матричный набор для комплексной эколого-экономической оценки безопасности территорий, на которых осуществляется водоочистка, в соответствии с парадигмой экономики замкнутого цикла. Перечень показателей представлен в табл. 1.

Показатель циркулярности для потока сточных вод в категории Reduce (CEI_{WP}). CEI_{WP} измеряет эффективность водоочистки. Базовая конструкция индикатора сформирована в рамках совершенствования методики оценки качества водоочистки с использованием показателя кратности. Кратность – это интенсивность негативного воздействия загрязняющих веществ на

водоем. Кратность M по загрязняющему веществу i рассчитывается следующим образом:

$$M_i = \frac{C_i^P}{MPC_i^P}, \quad (1)$$

где C_i^P – среднегодовая концентрация загрязняющего вещества i в сбрасываемых сточных водах, MPC_i^P – нормативы допустимых сбросов (НДС) для загрязняющего вещества i , установленные для субъекта хозяйственной деятельности.

Перечень наиболее значимых загрязняющих веществ с точки зрения соответствия технологии водоочистки наилучшим доступным технологиям, был определен автором исследования, который включает в себя: взвешенные вещества, биологическое потребление кислорода за 20 дней (БПК₂₀), фосфор фосфатов, нитрат-ион, нитрит-ион, азот аммонийный. CEI_{WP} рассчитывается следующим образом:

$$CEI_{WP} = \frac{\sum_{i=1}^6 MW_i}{6}, \quad (2)$$

где MW_i – вес по показателю кратность для каждого загрязняющего вещества. Вес по показателю кратность – это экспертная оценка кратности с учетом принципов циркулярной экономики. Она показывает, что чем больше загрязняющих веществ сверх предусмотренных НДС поступает в водные

Таблица 1

Матричный набор показателей циркулярности с учетом 3R-принципа

Потоки/категории 3R	Индикаторы циркулярности, включая		
	<i>Reduce</i>	<i>Reuse</i>	<i>Recycle</i>
Сточные воды	CEI_{WP}	CEI_{RU}	-
Осадок сточных вод	CEI_{DM}	CEI_{AD}	CEI_{RC}
Энергия	CEI_{EE}	CEI_{EG}	-

объекты, тем меньше значение показателя циркулярности. Система весов по показателю кратность представлена в табл. 2.

Дальнейшие исследования могут установить дополнительные показатели для значений кратности веса с учетом разницы в степени опасности веществ.

Показатель циркулярности для потока осадков сточных вод в категории Reduce (CEI_{DM}). Объем образования осадка сточных вод зависит от содержания сухого вещества (СВ) и применяемых методов обезвреживания. Удаление влаги является основным способом сокращения объема осадка сточных вод: увеличение содержания СВ в осадке сточных вод приводит к уменьшению объема (и массы) осадка, которые необходимо транспортировать и размещать на полигонах. Таким образом, прогресс на пути к принципам экономики замкнутого цикла прямо пропорционален содержанию СВ в осадке сточных вод. Показатель CEI_{DM} рассчитывается следующим образом:

$$CEI_{DM} = DM = \frac{M_{SS}^{DM}}{M_{SS}}, \quad (3)$$

где M_{SS}^{DM} – общий вес СВ в осадке сточных вод, M_{SS} – общий вес осадка сточных вод. В некоторых случаях, например, когда осадок сточных вод подвергается термической сушке и последующему использованию в качестве биотоплива, размещение осадка на полигонах не осуществляется, таким образом $CEI_{DM} = 1$ (отходы полностью трансформируются в ресурсы).

Показатель циркулярности для потока энергии в категории Reduce (CEI_{EE}). CEI_{EE} измеряет энергоэффективность СОСВ. CEI_{EE} принимается в соответствии со значениями системы весов нетто энергоэффективности (табл. 3), разработанной автором исследования, использующую специальный индикатор нетто энергоэффективности (EE_{NET}), который рассчитывается следующим образом:

$$EE_{NET} = \frac{EC_T - EG_R}{Q_{TWW}}, \quad (4)$$

где EC_T – общее нетто энергопотребление на СОСВ, отнесенное к полному циклу водоочистки, включая обработку осадка сточных вод, EG_R – общий объем выработки энергии на СОСВ за счет возобновляемых источников энергии (например, за счет биогаза), Q_{TWW} – общий объем очищенных сточных вод.

Система весов нетто энергоэффективности – это экспертная оценка нетто энергоэффективности с учетом принципов циркулярной экономики (табл. 3). Выбор значений интерпретации для табл. 3 был произведен в соответствии с типовыми значениями потребления СОСВ энергии, указанные в работах Института исследований электроснабжения (США) и Фонда водных исследований, а также в исследованиях Гандиглио и др. Значения табл. 4 указаны для двух типовых масштабов СОСВ.

Показатель циркулярности для потока сточных вод в категории Reuse (CEI_{RU}). CEI_{RU} измеряет повторное использование

Таблица 2

Система весов по показателю кратность

Показатель	Значение показателя кратности (М)			
	$0 \leq M \leq 1$	$1 < M \leq 5$	$5 < M \leq 15$	$M > 15.01$
Вес показателя кратность (MW)	1,00	0,50	0,25	0,00

очищенных сточных вод. Подобный показатель встречается в работах автора Молина-Санчес и др., Генг и др. и определяется как очищенный объем сточных вод, который можно повторно использовать, например, для полива или в городском хозяйстве (для мойки улиц). CEI_{RU} рассчитывается следующим образом:

$$CEI_{RU} = \frac{Q_{RU}}{Q_{TWW}}, \quad (5)$$

где Q_{RU} – общий объем повторно использованных сточных вод, Q_{TWW} – общий объем очищенных сточных вод.

Показатель циркулярности для потока осадков сточных вод в категории Reuse (CEI_{AD}). Анаэробное сбраживание осадка сточных вод в настоящее время относится к наилучшим доступным технологиям и рекомендована к внедрению на СОСВ по всему миру. CEI_{AD} рассчитывается следующим образом:

$$CEI_{AD} = \frac{Q_{AD}}{Q_{TSS}}, \quad (6)$$

где Q_{AD} – общий объем осадка сточных вод, который прошел стабилизацию через анаэробное сбраживание, Q_{TSS} – общий объем образованного осадка сточных вод.

Показатель циркулярности для потока энергии в категории Reuse (CEI_{EG}). Показатель CEI_{EG} тесно связан с показателем CEI_{AD} и имеет прямо пропорциональную зависимость. CEI_{EG} измеряет долю энергии, выработанной за счет возобновляемых источников в общем объеме затрат энергии и рассчитывается следующим образом:

$$CEI_{EG} = \frac{EG_R}{EC_T}, \quad (7)$$

где EG_R – общий объем энергии, выработанной на СОСВ за счет возобновляемых источников, EC_T – общий объем потребления энергии на СОСВ. Существуют возможные варианты, когда уровень выработки энергии за счет возобновляемых источников превышает уровень энергопотребления, однако данный подход рассматривает показатели на микроуровне, и основная задача в рамках перехода к экономике замкнутого цикла – покрыть собственные потребности в энергии.

Показатель циркулярности для потока осадков сточных вод в категории Recycle (CEI_{RC}). Показатель CEI_{RC} является единственным показателем в категории Recycle и измеряет уровень переработки обезвоженного осадка сточных вод (кека).

Таблица 3

Система весов нетто энергоэффективности

№	Значение EE_{NET} (кВтч/м ³)	CEI_{EE}	CEI_{EE}
		$V \geq 30\,000 \text{ м}^3/\text{сут.}$	$V \leq 30\,000 \text{ м}^3/\text{сут.}$
1	$EE_{NET} \leq 0,300$	1,00	1,00
2	$0,300 < EE_{NET} \leq 0,440$	0,80	1,00
3	$0,440 < EE_{NET} \leq 0,700$	0,60	0,80
4	$0,700 < EE_{NET} \leq 1,000$	0,40	0,60
5	$1,000 < EE_{NET} \leq 1,500$	0,20	0,40
6	$1,500 < EE_{NET} \leq 1,800$	0,00	0,20
7	$EE_{NET} > 1,800$	0,00	0,00

Например, переработка может быть осуществлена посредством термической сушки осадка и производства органического биотоплива для последующего сжигания в печах для производства портландцементного клинкера. CEI_{RC} рассчитывается следующим образом:

$$CEI_{RC} = \frac{M_{TDSS}^{Rcl}}{M_{TDSS}}, \quad (8)$$

где M_{TDSS}^{Rcl} – общая масса переработанного обезвоженного осадка сточных вод, M_{TDSS} – общая масса обезвоженного осадка сточных вод.

3.3. Интегральный индекс циркулярности

Интегральный индекс циркулярности ($ICIn$) предназначен для интеграции результатов матричного набора из семи индикаторов циркулярности, указанных выше. Этот индекс должен отражать прогресс в направлении циркулярности без искажений в аналогичном диапазоне выходных значений. Каждая из трех категорий 3R имеет одинаковое значение для прогресса циркулярности, а также три типа потока.

$ICIn$ рассчитывается следующим образом:

$$ICIn = \frac{\sum_{i=1}^7 CEI_i}{7}. \quad (9)$$

4. Полученные результаты

Период с 2014 по 2018 год был выбран для апробации предложенной методики оценки эффективности работы очистных сооружений при переходе к экономике замкнутого цикла. Для сценариев 1 и 2 значения были рассчитаны на протяжении всего периода, в то время как расчеты по сценарию 3 основаны на сценарии 2 с некоторыми корректировками (в рамках планов модернизации) и ориентиро-

ваны на будущую перспективу, начиная с 2018 года. Таким образом, сценарий 3 имеет две временные точки: «2018» (что равно значениям индикатора сценария 2) и «будущая перспектива».

В табл. 4 приведены результаты эксперимента, проведенного по рассмотренным сценариям с использованием данных производственного лабораторного контроля с Южной и Северной СОСВ, расположенных в городе Екатеринбург.

Суть экономики замкнутого цикла состоит не только в повторном использовании и рециклинге, но также в сокращении эмиссии, что особенно актуально для развивающихся странах. В некоторой степени природоохранные мероприятия по сокращению эмиссии можно считать первым шагом на пути к циркулярности. Под сокращением понимается минимизация затрат первичной энергии и сырья за счет повышения эффективности производства. Таким образом, использование принципа 3R в наборе показателей и интегральном индексе имеет большое значение.

Повторное использование товаров или ресурсов предполагает использование продукта снова для той же цели в его первоначальном виде или с незначительными улучшениями или изменениями. Повторное использование очищенных сточных вод считается одним из рекомендуемых решений проблемы дефицита воды. В некоторых странах, включая Грецию, Испанию, Италию, Кипр, Португалию и Францию, разработаны стандарты, специально предназначенные для повторного использования очищенных сточных вод. Рециклинг, в свою очередь, фокусируется на использовании отходов в качестве новых продуктов или материалов с целью сокращения потребления исходных материалов. Эти принципы как части всего процесса имеют различное иерархическое значение, при этом сокращение ресурсов используется в качестве

ведущего принципа в рамках циклической экономической системы.

Рис. 3 демонстрирует использование интегрального индекса циркулярности для оценки динамики соответствия рассматри-

ваемых сценариев принципам экономики замкнутого цикла начиная с 2014 года.

Результаты показывают, что текущая инвестиционная стратегия екатеринбургского водоканала неизбежно ведет к циркуляр-

Таблица 4

Результаты оценки циркулярности для предложенных сценариев

№	Сценарий	Год	Индикаторы циркулярности и интегральный индекс							
			CEI_{WP}	CEI_{DM}	CEI_{EE}	CEI_{RU}	CEI_{AD}	CEI_{EG}	CEI_{RC}	$ICIn$
1	1	2014	0,50	0,25	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22
2		2015	0,50	0,25	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22
3		2016	0,50	0,25	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22
4		2017	0,42	0,25	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18
5		2018	0,46	0,25	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19
6	2	2014	0,75	0,17	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
7		2015	0,71	0,17	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
8		2016	0,75	0,17	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25
9		2017	0,58	0,25	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23
10	3	2018	0,67	0,25	0,80	0,00	1,00	0,00	0,00	0,39
11		2018	0,67	0,25	0,80	0,00	1,00	0,00	0,00	0,39
12		БП*	0,67	1,00	1,00	0,00	1,00	0,67	1,00	0,76

Примечание: * будущая перспектива.

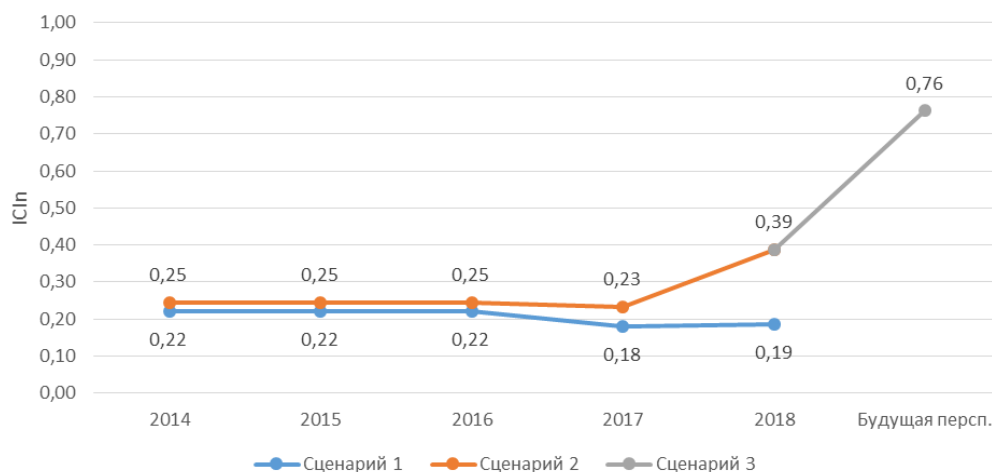


Рис. 3. Прогресс на пути к экономике замкнутого цикла

ности процесса водоочистки. Восходящая тенденция *ICIn* для сценария 2 относится к успешному завершению проекта модернизации для Северной СОСВ в 2018 году с полным обновлением технологии очистки сточных вод. Следующий шаг на пути к циркулярной экономике для Северной СОСВ – монтаж когенерационной установки и строительство цеха для сушки осадков сточных вод, что релевантно сценарию 3. Таким образом, Северная СОСВ может достичь 76 % циркулярности после реализации указанных мероприятий. С другой стороны, Южная СОСВ стремится к линейности и существует острая необходимость в ее глубокой модернизации с использованием проверенных решений, которые уже применяются на Северной СОСВ.

Повторное использование сточных вод (например, в целях орошения) в Российской Федерации и некоторых других странах ограничено правовыми или санитарными нормами, или сталкивается с культурными особенностями (некоторые люди могут испытать отвращение, если узнают, что сельскохозяйственные культуры производятся с использованием очищенных хозяйственно-бытовых сточных вод), поэтому достижение высоких показателей циркуляции затруднено. Однако существует альтернатива по использованию очищенных сточных вод в промышленных и коммунальных целях, например для очистки улиц, в системах охлаждения машин и механизмов, для централизованного отопления, при строительстве объектов и т.д.

Выводы

Предлагаемый инструментарий по оценке эффективности водоочистки с учетом принципов циркулярной экономики может быть использован как элемент публичной нефинансовой отчетности, например в рамках стандартов раскрытия информации в сфере водопроводно-канализационного

хозяйства, а также в национальной системе бенчмаркинга. Проведение эталонного сравнения (бенчмаркинг) подразумевает процесс, направленный на поиск, оценку и трансфер наилучшего опыта ведения бизнеса и внедрения наилучших доступных технологий. Он позволяет определить сильные и слабые стороны предприятия, в том числе аспекты, нуждающиеся в оптимизации.

Такая информация позволит обеспечить основным стейкхолдерам устойчивость, прозрачность и безопасность в долгосрочной перспективе: для инвесторов – понятные правила работы, для потребителей – высокое качество услуг по доступным ценам, органам государственной и муниципальной власти – обеспечение жителей инфраструктурой и решение модернизационных проблем.

Предлагаемый набор показателей и интегральный индекс циркулярности создают эффективный инструмент оценки, который достаточно прост для расчета и интерпретации и пригоден для использования широким кругом заинтересованных сторон. По сравнению с ранее разработанными подходами предложенный инструментарий не требует значительных входных данных, а результаты легко интерпретируются.

Однако применение данного метода имеет некоторые ограничения. Набор индикаторов циркулярности основан на принципе измерения средних значений каждого потока (например, объемных единиц) и не учитывает масштабы сооружений. Возможны варианты, когда интегральный индекс циркулярности близок к максимальным значениям, но компонент качества водоочистки умеренный, и в рамках крупных масштабов сооружений огромное количество отходов поступает в водные объекты. Планируются дальнейшие исследования в рамках многофакторной структуры для уточнения расчета интегрального индекса циркулярности.

Список использованных источников

1. Pintilie L., Torres C.M., Teodosiu C., Castells F. Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 139. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.209.
2. United Nations Sustainable Development [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.un.org/sustainabledevelopment>.
3. Naidoo S., Olaniran A.O. Treated wastewater effluent as a source of microbial pollution of surface water resources // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2014. Vol. 11, Issue 1. P. 249–270. DOI: 10.3390/ijerph110100249.
4. Back to Our Common Future: Sustainable Development in the 21st Century (SD21) Project. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2012. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/UN-DESA_Back_Common_Future_En.pdf.
5. Niu K., Wu J., Qi L., Niu Q. Energy intensity of wastewater treatment plants and influencing factors in China // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 670. P. 961–970. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.159.
6. Pajares E.M., Valero L.G., Sánchez I.M.R. Cost of urban wastewater treatment and ecotaxes: Evidence from municipalities in southern Europe // *Water*. 2019. Vol. 11, Issue. 3. P. 423.
7. Langone M., Ferrentino R., Trombino G., Waubert De Puiseau D., Andreottola G., Rada E.C., Ragazzi M. Application of a novel hydrodynamic cavitation system in wastewater treatment plants // *UPB Scientific Bulletin. Series D*. 2015. Vol. 77, Issue 1. P. 225–234.
8. Ragazzi M., Catellani R., Rada E.C., Torretta V., Salazar-Valenzuela X. Management of urban wastewater on one of the Galapagos Islands // *Sustainability*. 2016. Vol. 8, Issue 3. P. 208.
9. Eggimann S., Truffer B., Feldmann U., Maurer M. Screening European market potentials for small modular wastewater treatment systems – an inroad to sustainability transitions in urban water management? // *Land Use Policy*. 2018. Vol. 78. P. 711–725.
10. Managing Water under Uncertainty and Risk // *The UN World Water Development Report 4*. Vol. 1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2012. 867 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf>.
11. The State of Renewable Energies in Europe. Edition 2016. 16th EurObserv'ER Report, EurObserv'ER consortium, 2016. 265 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.eurobserv-er.org/pdf/2016/EurObservER-Annual-Overview-2016-EN.pdf>.
12. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Ellen MacArthur Foundation, 2013. Vol. 1. 96 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.
13. Circularity Indicators. An Approach to Measuring Circularity. Methodology. Ellen MacArthur Foundation,

2015. 97 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators_Methodology_May2015.pdf.
14. Saidani M., Yannou B., Leroy Y., Cluzel F., Kendall A. A taxonomy of circular economy indicators // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 207. P. 542–559.
15. Heshmati A. A Review of the Circular Economy and its Implementation // IZA Discussion Paper. No. 9611. Bonn: Institute for the Study of Labor (IZA), 2015. 61 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/130297/1/dp9611.pdf>.
16. Pinter L. International Experience in Establishing Indicators for the Circular Economy and Considerations for China. Report for the Environment and Social Development Sector Unit, East Asia and Pacific Region. World Bank, 2006. 27 p.
17. van Leeuwen K., de Vries E., Koop S., Roest K. The Energy & Raw Materials Factory: Role and Potential Contribution to the Circular Economy of the Netherlands // *Environmental Management*. 2018. Vol. 61. P. 786–795. DOI: 10.1007/s00267-018-0995-8.
18. On a Monitoring Framework for the Circular Economy // Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Strasbourg: European Commission, 2018. 10 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/monitoring-framework.pdf>.
19. Closing the Loop – an EU Action Plan for the Circular Economy // Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels: European Commission, 2015. 21 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF.
20. Buonocore E., Mellino S., De Angelis G., Liu G., Ulgiati S. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment // *Ecological Indicators*. 2018. Vol. 94. P. 13–23. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.047.
21. Geng Y., Fu J., Sarkis J., Xue B. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 23. P. 216–224.
22. Cai Z.C., Wennerstern R. Ecological Urban Design through Material and Energy Flow Analysis and Life Cycle Assessment: from an architect's perspective // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2010. Vol. 142. P. 3–13.
23. Rukavishnikova I., Kiselev A., Berezyuk M., Ashirova I. Improvement of the methodology for assessing domestic wastewater treatment quality using benchmarking tools // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2018. Vol. 228. P. 209–219.
24. Kiselev A., Magaril E., Magaril R., Panepinto D., Ravina M., Zanetti M.C. Towards Circular Economy: Evaluation of Sewage Sludge Biogas Solutions // *Resources*. 2019. Vol. 8, Issue 2. P. 91. DOI: 10.3390/resources8020091.
25. Pabi S., Amarnath A., Goldstein R., Reekie L. Electricity Use and

- Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries // Electric Power Research Institute and Water Research Foundation. Report No.: 3002001433. Water Research Foundation, 2013.
26. Gandiglio M., Lanzini A., Soto A., Leone P., Santarelli M. Enhancing the Energy Efficiency of Wastewater Treatment Plants through Co-digestion and Fuel Cell Systems // *Frontiers in Environmental Science*. 2017. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2017.00070/full>.
27. Molina-Sánchez E., Leyva-Díaz J.C., Cortés-García F.J., Molina-Moreno V. Proposal of Sustainability Indicators for the Waste Management from the Paper Industry within the Circular Economy Model // *Water*. 2018. Vol. 10, Issue 8. P. 1014. DOI: 10.3390/w10081014.
28. Su B., Heshmati A., Geng Y., Yu X. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 42. P.215–227. DOI:10.1016/j.jclepro.2012.11.020.

Kiselev A.V.*Ural Federal University**named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,**Ekaterinburg, Russia***Magaril E.R.***Ural Federal University**named after the First President of Russia B.N. Yeltsin,**Ekaterinburg, Russia*

ENSURING WATER TREATMENT ASSESSMENT WITHIN SPATIAL ECOLOGICAL AND ECONOMIC SECURITY FRAMEWORK TOWARDS CIRCULAR ECONOMY

Abstract. The article is focused on an urgent and global issue of water pollution due to inefficient nature management. The authors examine it in the context of the Circular Economy paradigm and environmental and economic security of territories. A number of tasks, including the systematization of the existing methodology for assessing the wastewater treatment efficiency; the development of a new toolkit as part of the environmental and economic security policy of the territories that would meet the principles of the circular economy; testing the proposed indicators set to check the progress towards circular economy, are under consideration as part of the current research. Clear and representative results were obtained to evaluate the efficiency of the wastewater treatment technological process under three different scenarios in various territories. These data is quite simple for interpretation by a wide range of stakeholders and can be used as benchmarking for spatial industry assessment or analysis of the dynamics of a particular business entity. The proposed toolkit for assessing the effectiveness of water treatment taking into account the principles of the circular economy can be used as an element of public non-financial reporting, for example, within the framework of disclosure standards in the field of plumbing and sewage, as well as in the national benchmarking system. Carrying out benchmarking involves a process aimed at searching, evaluating and transferring the best business practices and introducing the best available technologies. It enables one to identify the strengths and weaknesses of the enterprise, including aspects that need to be optimized. Such information will ensure long-term sustainability, transparency and security for the main stakeholders: for investors – clear rules of work, for consumers - high quality services at affordable prices, for state and municipal authorities – providing residents with infrastructure and solving modernization problems.

Key words: sustainable development; economic security; wastewater treatment; circular economy; key performance indicators; circularity index; benchmarking.

Reference

1. Pintilie, L., Torres, C.M., Teodosiu, C., Castells, F. (2016). Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 139, 1–14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.209.
2. United Nations Sustainable Development. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment>.
3. Naidoo, S., Olaniran, A.O. (2014). Treated wastewater effluent as a source of microbial pollution of surface water

- resources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 11, Issue 1, 249–270. DOI: 10.3390/ijerph110100249.
4. Back to Our Common Future: Sustainable Development in the 21st Century (SD21) Project (2012). United Nations, Department of Economic and Social Affairs. Available at: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/UN-DESA_Back_Common_Future_En.pdf.
 5. Niu, K., Wu, J., Qi, L., Niu, Q. (2019). Energy intensity of wastewater treatment plants and influencing factors in China. *Science of the Total Environment*, Vol. 670, 961–970. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.159.
 6. Pajares, E.M., Valero, L.G., Sánchez, I.M.R. (2019). Cost of urban wastewater treatment and ecotaxes: Evidence from municipalities in southern Europe. *Water*, Vol. 11, Issue. 3, 423.
 7. Langone, M., Ferrentino, R., Trombino, G., Waubert De Puiseau, D., Andreottola, G., Rada, E.C., Ragazzi, M. (2015). Application of a novel hydrodynamic cavitation system in wastewater treatment plants. *UPB Scientific Bulletin. Series D*, Vol. 77, Issue 1, 225–234.
 8. Ragazzi, M., Catellani, R., Rada, E.C., Torretta, V., Salazar-Valenzuela, X. (2016). Management of urban wastewater on one of the Galapagos Islands. *Sustainability*, Vol. 8, Issue 3, 208.
 9. Eggimann, S., Truffer, B., Feldmann, U., Maurer, M. (2018). Screening European market potentials for small modular wastewater treatment systems – an inroad to sustainability transitions in urban water management? *Land Use Policy*, Vol. 78, 711–725.
 10. Managing Water under Uncertainty and Risk (2012). *The UN World Water Development Report 4*. Vol. 1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 867 p. Available at: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf>.
 11. The State of Renewable Energies in Europe (2016). Edition 2016. 16th EurObserv'ER Report, EurObserv'ER consortium, 265 p. Available at: <https://www.eurobserv-er.org/pdf/2016/EurObservER-Annual-Overview-2016-EN.pdf>.
 12. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition (2013). Ellen MacArthur Foundation, Vol. 1, 96 p. Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.
 13. Circularity Indicators. An Approach to Measuring Circularity. Methodology (2015). Ellen MacArthur Foundation, 97 p. Available at: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators_Methodology_May2015.pdf.
 14. Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 207, 542–559.
 15. Heshmati, A. (2015). A Review of the Circular Economy and its Implementation. *IZA Discussion Paper*, No. 9611. Bonn, Institute for the Study of Labor (IZA), 61 p. Available at: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/130297/1/dp9611.pdf>.
 16. Pinter, L. (2006). *International Experience in Establishing Indicators for the Circular Economy and Considerations for China*. Report for the Environment and Social Development Sector Unit, East Asia and Pacific Region. World Bank, 27 p.

17. van Leeuwen, K., de Vries, E., Koop, S., Roest, K. (2018). The Energy & Raw Materials Factory: Role and Potential Contribution to the Circular Economy of the Netherlands. *Environmental Management*, Vol. 61., 786–795. DOI: 10.1007/s00267-018-0995-8.
18. On a Monitoring Framework for the Circular Economy (2018). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. Strasbourg, European Commission, 10 p. Available at: <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/monitoring-framework.pdf>.
19. Closing the Loop – an EU Action Plan for the Circular Economy (2015). *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*. Brussels, European Commission, 21 p. Available at: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF.
20. Buonocore, E., Mellino, S., De Angelis, G., Liu, G., Ulgiati, S. (2018). Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecological Indicators*, Vol. 94, 13–23. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.04.047.
21. Geng, Y., Fu, J., Sarkis, J., Xue, B. (2012). Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 23, 216–224.
22. Cai, Z.C., Wennerstern, R. (2010). Ecological Urban Design through Material and Energy Flow Analysis and Life Cycle Assessment: from an architect's perspective. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 142, 3–13.
23. Rukavishnikova, I., Kiselev, A., Berezyuk, M., Ashirova, I. (2018). Improvement of the methodology for assessing domestic wastewater treatment quality using benchmarking tools. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 228, 209–219.
24. Kiselev, A., Magaril, E., Magaril, R., Panepinto, D., Ravina, M., Zanetti, M.C. (2019). Towards Circular Economy: Evaluation of Sewage Sludge Biogas Solutions. *Resources*, Vol. 8, Issue 2, 91. DOI: 10.3390/resources8020091.
25. Pabi, S., Amarnath, A., Goldstein, R., Reekie, L. (2013). *Electricity Use and Management in the Municipal Water Supply and Wastewater Industries*. Electric Power Research Institute and Water Research Foundation, Report No.: 3002001433. Water Research Foundation.
26. Gandiglio, M., Lanzini, A., Soto, A., Leone, P., Santarelli, M. (2017). Enhancing the Energy Efficiency of Wastewater Treatment Plants through Co-digestion and Fuel Cell Systems. *Frontiers in Environmental Science*. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2017.00070/full>.
27. Molina-Sánchez, E., Leyva-Díaz, J.C., Cortés-García, F.J., Molina-Moreno, V. (2018). Proposal of Sustainability Indicators for the Waste Management from the Paper Industry within the Circular Economy Model. *Water*, Vol. 10, Issue 8, 1014. DOI: 10.3390/w10081014.
28. Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., Yu, X. (2013). A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 42, 215–227. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.11.020.

Information about the authors

Kiselev Andrey Vladimirovich – Post-Graduate Student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia (620002, Ekaterinburg, Mira street, 19); e-mail: ipkiselyov@mail.ru.

Magaril Elena Romanovna – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Department of Environmental Economics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia (620002, Ekaterinburg, Mira street, 19); e-mail: magaril67@mail.ru.

Для цитирования: Киселев А.В., Магарил Е.Р. Обеспечение эффективности водоочистки в условиях циркулярной экономики как элемент эколого-экономической безопасности территорий // Вестник УрФУ. Серия экономика и управление. 2019. Т. 18, № 6. С. 911–929. DOI: 10.15826/vestnik.2019.18.6.044.

For Citation: Kiselev A.V., Magaril E.R. Ensuring Water Treatment Assessment within Spatial Ecological and Economic Security Framework Towards Circular Economy. *Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management*, 2019, Vol. 18, No. 6, 911–929. DOI: 10.15826/vestnik.2019.18.6.044.

Информация о статье: дата поступления 1 ноября 2019 г.; дата принятия к печати 1 декабря 2019 г.

Article Info: Received November 1, 2019; Accepted December 1, 2019.