

Возможности биотехнологий в развитии циркулярной экономики: очистка сточных вод¹

Н.А. Кравченко, Н.А. Исаева

УДК 338.465

DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2025-3-227-243

Аннотация. В статье анализируются возможности биотехнологий в процессе развития циркулярной экономики в сфере водопользования, а именно – очистки стоков использованной (загрязненной) воды. Рассмотрены состояние проблемы в России; ключевые технологии, применяемые в этой сфере; подчеркнута роль, перспективы и преимущества биотехнологий в системах очистки стоков; выделены главные институциональные и экономические барьеры, мешающие их более широкому применению. Представлены основные подходы к экономической оценке затрат и выгод от использования биотехнологий при очистке стоков.

Ключевые слова: биотехнологии; очистка сточных вод; циркулярная экономика; технологии очистки сточных вод; оценка затрат и выгод

Летом 2024 г. весь мир облетели фотографии и видеоролики, на которых участники Олимпийских игр в Париже совершали заплывы по Сене, рискуя здоровьем. Плавать в этой реке запретили более 100 лет назад (в 1923 г.) из-за высокого уровня загрязнения. Для очистки Сены к Олимпиаде было потрачено около 1,4 млрд евро, но ливневые дожди не позволили добиться желаемого результата, вода остается опасной для здоровья, и многие спортсмены жаловались на плохое самочувствие после соревнований².

Может ли такая ситуация произойти в России? Полагаем, что признаваемая актуальность проблемы переработки отходов, включая сточные воды, развитие природосберегающих технологий их очистки и переработки, реализация федеральной программы «Чистая вода» в составе национальных приоритетов развития позволят предупредить и предотвратить подобное развитие событий.

Основным источником загрязнений природной среды органическими и неорганическими веществами считается антропогенный фактор, т.е. производственная, хозяйственная и бытовая деятельность, хотя атмосферные осадки также вносят свой вклад. В данной работе рассматривается только один из факторов

¹ Работа выполнена по плану НИР ИЭОПП, Проект 5.6.1.5. (0260-2021-0003) «Теория и методология исследования устойчивого развития компаний высокотехнологичного и наукоемкого сектора экономики в контексте глобальных вызовов внешней среды, технологических, организационных и институциональных сдвигов».

² С Сены воды не пить // Коммерсантъ. 05.08.2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6877765>

загрязнения – сточные воды, образующиеся после использования воды для бытовых или производственных нужд и попадающие в природную среду.

Неочищенные и необработанные сточные воды накапливаются в поверхностных и подземных водоемах, почве, воздухе, что порождает неблагоприятные изменения почв, разрушение природных экосистем (болезни и потери растений и животных) и, в конечном счете, наносит вред здоровью людей. По некоторым данным, 80% заболеваний и 50% детских смертей во всем мире связаны с плохим качеством воды [Lin et al., 2022].

При этом мировая практика демонстрирует успешные примеры не только сбора и очистки сточных вод, но и их повторного использования. Основное направление технологического развития в этой области ориентировано на расширение использования биотехнологий и создание систем, поддерживающих экономику замкнутого цикла (циркулярную), причем все больше внимания уделяется обеспечению экономической эффективности последних.

Данная работа направлена на демонстрацию возможностей биотехнологической очистки сточных вод, а также выявление основных барьеров для расширения и распространения использования биотехнологий в России. При подготовке статьи использовались материалы серии круглых столов по биотехнологиям, проведенных под эгидой журнала «ЭКО» в 2024 г. с участием ученых СО РАН и представителей биотехнологической промышленности.

Состояние проблемы в мире и в России

Рост населения, изменение климата, повышение требований к защите природных источников воды и другие факторы повышают актуальность поиска альтернативных источников чистой воды, в том числе растет интерес к очистке сточных вод. Сегодня стоит задача сделать их не просто безопасными для природной среды или пригодными для нужд производственного сектора, но и отвечающими требованиям для прямого повторного использования в системе водоснабжения.

Сточные воды в широком смысле определяются как «использованная» вода, которая была загрязнена в результате деятельности человека. Выделяются производственные стоки, которые являются результатом промышленной и сельскохозяйственной деятельности, бытовые (коммунальные) стоки – результат жизнедеятельности домашних хозяйств, и атмосферные, содержащие талый снег и дождевую воду. По данным Всемирного фонда дикой природы³, примерно 80% мирового объема сточных вод сбрасывается в окружающую среду без очистки; страны с высоким уровнем дохода очищают около 70% общего объема сточных вод, а развивающиеся экономики – примерно 28%.

С течением времени объем использования воды и, соответственно, ее загрязнения увеличивается. Более того, возникают новые источники и виды загрязнений.

³ World Wide Fund For Nature (WWF) (2023). The High Cost of Cheap Water: The True Value of Water and Freshwater Ecosystems to People and Planet. Gland, Switzerland, WWF.

В Отчете ООН о воде за 2024 г.⁴ отмечается появление в природных водоемах новых загрязняющих веществ, включая фармацевтические препараты, гормоны, промышленные химикаты, моющие средства. В исследовании 258 рек мира было обнаружено, что более четверти из них имеют концентрации активных фармацевтических ингредиентов, которые превышают безопасные пределы [Wilkinson et al., 2022]. Хотя их воздействие на здоровье человека и биоразнообразие пока недостаточно изучено, есть большая вероятность, что это увеличит устойчивость людей и животных к антибиотикам.

Очистка сточных вод может улучшить качество речной воды и здоровье экосистемы, одновременно предоставляя альтернативный источник пресной воды, особенно для сельскохозяйственных и промышленных целей и, следовательно, снижая конкуренцию за природные водные ресурсы⁵.

В развитых странах в управлении водными ресурсами происходит сдвиг парадигмы в сторону циркулярной экономики, которая рассматривает отходы как вторичный источник ресурсов, в нашем случае – «надежный альтернативный источник воды». Так, например, для промышленности сточные воды могут стать устойчивым источником энергии, питательных веществ и побочных продуктов⁶. Основными препятствиями для восстановления ресурсов и энергии из сточных вод являются отсутствие технологий, обеспечивающих приемлемую рентабельность, износ инфраструктуры, проблемы управления сточными водами [Wilkinson et al., 2022]. При этом независимо от того, будут ли стоки использоваться повторно или сброшены обратно в окружающую среду, их необходимо предварительно очистить.

На повышение качества воды направлена одна из Целей устойчивого развития, предложенных ООН⁷ в 2015 г. (ЦУР 6.3), которая формулируется следующим образом: «К 2030 году улучшить качество воды путем сокращения загрязнения, ликвидации сброса отходов и сведения к минимуму выбросов опасных химических веществ и материалов, сокращения вдвое доли неочищенных сточных вод и существенного увеличения переработки и безопасного повторного использования во всем мире». Индикатор 6.3.1 отслеживает долю общих, промышленных и бытовых потоков сточных вод, безопасно очищаемых в соответствии с национальными или местными стандартами. По данным ЕМИСС⁸, в 2023 г. в РФ

⁴ The United Nations World Water Development Report 2024. Water for prosperity and peace Facts, Figures and Action Examples. Available at: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024>

⁵ WWAP (UNESCO World Water Assessment Programme) (2017). *The United Nations World Water Development Report 2017*. Wastewater: The Untapped Resource. Paris, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)

⁶ Там же.

⁷ URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> – цели устойчивого развития ООН (дата обращения: 20.04.2025).

⁸ Росстат, данные по показателям ЦУР – <https://rosstat.gov.ru/sdg/data/goal6>, данные ЕМИСС. URL: <https://fedstat.ru/indicator/58360#> (дата обращения: 20.04.2025).

этот индикатор составил 24,4% (доля нормативно очищенной сточной воды), что значительно меньше, чем у стран-лидеров (США – 98%, Швейцария – 99%); в СНГ лучше всех справляется с проблемой Белоруссия, где очищается 80% сточных вод, по данным ООН⁹.

Объем мирового рынка очистки воды и сточных вод оценивался в 323,32 млрд долл. в 2023 г., и ожидается его увеличение до 617,81 млрд долл.¹⁰ в 2032 г., со среднегодовым темпом роста в 7,5%.

Россия в настоящее время уступает мировым лидерам по основным характеристикам обращения со сточными водами: сбору, очистке и использованию.

По данным Индекса экологической эффективности¹¹, РФ занимает 64-е место в мире по санитарии, по качеству питьевой воды делит 39-е место с Японией (возглавляют рейтинг по этому показателю Сингапур, Италия и Великобритания).

Многолетнее наблюдение (2013–2022 г.)¹² за состоянием поверхностных водных объектов России показывает, что в большинстве из них вода сильно загрязнена. Это обусловлено загрязнением водосборных площадей и сбросом неочищенных (или плохо очищенных) стоков промышленных и коммунальных предприятий.

Несмотря на тенденции к снижению уровня сброса загрязненных вод, постоянный рост затрат на очистку стоков, фиксируемые Росстатом (табл. 1), ситуация все еще далека от благополучной.

Таблица 1. Динамика изменения сброса загрязненных сточных вод и затрат на их очистку с 2018 по 2022 гг.

Показатель	2018	2019	2020	2021	2022
Сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты, млн м ³	13136	12600	11678	11580	11326
Сброс загрязненных вод по отношению к забору воды, %			21,6	20,7	20,0
Текущие затраты на сбор и очистку сточных вод, млн руб.	173,6	174,9	181,6	187,7	204,2

Источник. Росстат. Сведения о текущих затратах на охрану окружающей среды с 2019 по 2022 год. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 23.03.2024).

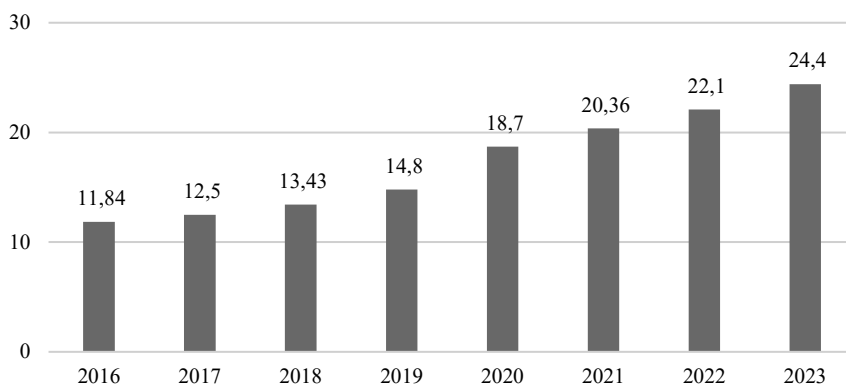
⁹ URL: <https://sdg6data.org/en/snapshots#demo-wrapper> – портал данных ООН о достижении целей устойчивого развития (дата обращения: 20.04.2025).

¹⁰ Fortune Business insights. Water and Waste treatment. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/water-and-wastewater-treatment-market-102632>

¹¹ Индекс экологической эффективности (Environmental Performance Index, Университет Йеля) включает много показателей, связанных с окружающей средой. Категория «Санитария и питьевая вода» измеряет, насколько хорошо защищено здоровье человека от экологических рисков по двум показателям: небезопасная питьевая вода и небезопасная санитария. URL: <https://epi.yale.edu/measure/2024/H2O>

¹² Аналитический бюллетень «Тенденции и динамика состояния и загрязнения окружающей среды РФ по данным многолетнего мониторинга Росгидромета». / Отв. ред. Г.М. Черногаева. http://downloads.igce.ru/electronic_publications/Review_of_Tendencies_and_Dynamics_2022.pdf

Отметим, что в России создана законодательная база и заданы нормативы очистки стоков, разработаны также национальные стандарты, санитарные требования и нормы¹³, однако они соблюдаются далеко не всеми. По данным ЕМИСС¹⁴, на протяжении последних лет (с 2016 по 2023 гг.) в России доля очистки сточных вод до нормативных значений устойчиво растет, но пока большая часть стоков не соответствует нормативным значениям очистки (рис. 1).



Источник. Составлено по данным ЕМИСС. URL: <https://fedstat.ru/indicator/58360> (дата обращения: 22.04.2025).

Рис. 1. Доля нормативно очищенной чистой воды¹⁵ в России (в соответствии с ЦУР 6.3.1) в 2016–2023 гг.

Отметим, что за среднегодовыми показателями скрываются случаи выбросов с высоким и экстремально высоким загрязнением, которые наносят не всегда восстановимый вред экосистеме водоемов. Большая часть экстремальных загрязнений

¹³ Федеральный закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ (ред. от 08.08.2024) «О водоснабжении и водоотведении» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025).

Постановление Правительства РФ № 728 от 22.05.2020 «Об утверждении Правил осуществления контроля состава и свойств сточных вод» (включая внесенные изменения).

Национальный стандарт РФ Биологическая безопасность. Очистка сточных, технических, поверхностных вод и фильтратов полигонов твердых коммунальных отходов на основе обратного осмоса. Общие технические условия.

Национальный стандарт РФ Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования.

¹⁴ Сведения о доле очищенных сточных вод в общем объеме сточных вод с 2013 по 2022 год. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/43555> (дата обращения: 30.03.2024).

¹⁵ Показатель рассчитывается Федеральным агентством водных ресурсов. Нормативно очищенные сточные воды – сточные воды, содержание загрязняющих веществ в которых после очистки на очистных сооружениях не превышает допустимых значений, установленных разрешительным документом. Доля нормативно очищенных сточных вод рассчитывается путем деления объема нормативно очищенной сточной воды на их общий объем.

выявлена в развитых промышленных центрах и густонаселенных регионах. Наиболее распространенными загрязняющими веществами поверхностных вод РФ являются соединения меди, железа, цинка, марганца, алюминия, фенолы, нефтепродукты, органические вещества, по которым превышение ПДК оставалось высоким, незначительно изменяясь из года в год в меньшую или большую сторону¹⁶.

Технологии очистки сточных вод

В настоящее время используется широкий спектр технологий для очистки стоков. В городах бытовые стоки, как правило, собираются коллекторами и проходят через специальные очистные сооружения. Производственные стоки не всегда собираются централизованно, крупные предприятия чаще используют собственные системы очистки, некоторые нарушают нормативы или вовсе пренебрегают очисткой¹⁷.

Очистка сточных вод обычно состоит из трех этапов (первичная, вторичная и третичная), которые отличаются уровнем очистки и применяемыми технологиями. Выбор конкретных технологий для каждого из этапов определяется множеством условий, включая технологическую осуществимость и экономическую состоятельность. Разнообразие загрязнений, их объем и состав, размещение систем очистки, климатические условия, нормативные требования и стандарты очистки, а также многие другие обстоятельства формируют уникальный характер каждой станции (системы) очистки. В некоторых случаях необходимо применение специальных методов обработки.

Используемые в системах очистки технологии [Вертинский, 2019; Вайцель, 2019; Веа et al., 2022] направлены на разные виды примесей и подразделяются на следующие виды.

Механическая очистка с использованием сеток и фильтров применяется на первичном этапе для отсеивания таких загрязнений, как песок, гравий и другие крупные примеси. При этом мелкодисперсные и коллоидные частицы механическим способом практически не удаляются.

Физико-химические технологии – весьма многочисленная и на данный момент основная группа, применяется на вторичном и третичном этапах и позволяет удалить большинство вредных примесей, включая трудноокисляемые и органические соединения. При этом используются процессы коагуляции, осаждения, нейтрализации, окисления при помощи озона, фтора, хлора и других веществ, а также ионный обмен, обратный осмос и др. После применения каждого отдельного физико-химического метода остаются побочные продукты, которые требуют доочистки.

¹⁶ Качество поверхностных вод РФ. Ежегодник 2023. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, ФГБУ Гидрохимический институт. Гл. ред. М.М. Трофимчук. Ростов-на-Дону, 2024.

¹⁷ Три тамбовских предприятия привлекли к ответственности за загрязнение реки Цны // Коммерсантъ. 18.11.2022. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5678633>

Биологические технологии, которые считаются наиболее эффективными, основаны на естественных процессах очистки рек и водоемов. Они используют живые микроорганизмы (бактерии, простейшие грибы, водоросли и др.), которые разрушают органические вещества и бактерии, служащие для них источником энергии и питательных веществ. Биосистемы очистки включают активные иловые установки, биофильтры, мембранные биореакторы, биопруды, поля фильтрации и гидропоники и др.

Методы биотехнологической очистки¹⁸ относятся к одному из двух типов: аэробные и анаэробные. Первые из них используют активный кислород, который является необходимым компонентом для жизнедеятельности микроорганизмов. Аэробные процессы очистки сточных вод часто происходят в естественных условиях на полях орошения, полях фильтрации, биологических прудах, болотах и др.

Самые распространенные виды аэробных сооружений – аэротенки и биофильтры. В аэротенках микроорганизмы производят очистку сточных вод путем образования активного ила, который перемещается внутри емкости, насыщаясь кислородом, разрушая и трансформируя органические соединения. Основой биофильтров служит специальный загрузочный материал (щебень, галька, керамзит, пластмасса), на поверхности которого выращивается пленка из микроорганизмов. Именно на ней задерживаются и разлагаются примеси сточных вод. Активированный ил является доминирующим типом реактора сегодня, но другие типы, такие как биопленки, гранулы, мембранные биореакторы и т.д., могут в некоторых случаях превосходить традиционные системы по тем или иным характеристикам.

Анаэробные методы не предполагают доступ к кислороду. Они используются для очистки особо загрязненных стоков, которые содержат вредные для аэробных микроорганизмов вещества. Основой анаэробных очистных сооружений является метантенк, где происходит сбраживание органических осадков с образованием метана и двуокиси углерода. Анаэробные методы требуют больших затрат при строительстве, но потребляют меньше энергии в процессе эксплуатации, кроме того, выделяемый биогаз может использоваться для производства тепла или для других целей. Методы анаэробной и аэробной очистки могут применяться последовательно.

Результатом биоочистки является чистая вода и осадок, который обезвреживается и утилизируется (вывозится на полигоны или сжигается). Сжигание осадка может служить источником тепловой энергии, зола может использоваться в производстве строительных материалов, быть сырьем для сорбентов и пр., т.е. в принципе осадок способен приносить дополнительный доход, что повышает рентабельность системы очистки в целом.

¹⁸ Справочник наилучших эффективных технологий (Базовые материалы). Раздел: водоотведение. Подраздел: очистные сооружения канализации (ОСК) Д.А. Данилович. М., 2015. URL: <https://www.gkhrazvitie.ru/media/127820/ochistka-stochnyh-vod.pdf> (дата обращения: 15.04.2025).

Исследования и разработки, расширяющие знания о микроорганизмах и их свойствах, предопределяют появление все более совершенных методов очистки – более эффективных, экономичных, контролируемых, управляемых извне.

Многочисленные работы, основанные преимущественно на данных развитых стран, показывают универсальность биологической очистки сточных вод различного происхождения [Allan Soo et al., 2024; Sravan et al., 2024]. В то же время существует немало аргументов в пользу интегрированного подхода, где используется комбинация различных методов, которая зависит от характеристик сточных вод и внешних условий (например, некоторые технологии чувствительны к внешней температуре). Как показано в обзорах зарубежных коллег [Renfrew et al., 2022; Dhananjay Singh et al., 2024], интегрированный подход в большей степени соответствует циркулярной экономике, где отходы, в том числе осадки сточных вод, используются как ресурсы, создающие добавленную стоимость и приносящие доход.

Новые технологии очистки стоков

За последнее десятилетие появились новые технологии очистки, среди них есть и биотехнологии. В числе ведущих трендов в данной сфере специалисты¹⁹ [Байгильдиев и др., 2025; Nielsen, 2017; Rui Du et al., 2019; Dare et al., 2017] выделяют следующие:

- мембранная технология – физический метод; фильтрация воды через мембраны различной пористости. Мембранная фильтрация включает ультра-, нано, микрофильтрацию, прямой и обратный осмос. Ультрафильтрация способна удалять даже взвешенные частицы, бактерии и вирусы, а обратный осмос позволяет одновременно удалять растворённые примеси, органические и неорганические вещества, вирусы и бактерии;

- нанофильтрация²⁰ воды обеспечивает снижение содержания солей кальция и магния, удаляет соли тяжелых металлов, высокомолекулярные органические соединения. Нанофильтры обеспечивают более тонкую очистку, чем установки микро- и ультрафильтрации и задерживают больше вредных примесей, пестицидов, вирусов и бактерий. Однако, в отличие от обратного осмоса, установки нанофильтрации позволяют сохранить в очищенной воде полезные микро- и макроэлементы;

- облучение (ультрафиолетовое, ионизирующее, гамма-лучами) повышает эффективность разложения органических загрязнителей, включая бактерии, пестициды и фенолы. УФ-свет служит естественным дезинфицирующим средством

¹⁹ Ноэль Я. Живая вода: пять прогрессивных технологий очистки // РБК- тренды. 2021 (дата обращения: 20.04.2025).

²⁰ Источник: сайт компании Diasel Engineering, поставщика решений в области водоочистки и водоподготовки. URL: <https://diasel.ru/article/chto-takoe-nanofiltraciya/> (дата обращения: 27.04.2025).

для органических загрязнителей сточных вод. Облучение позволяет уничтожать патогенные микроорганизмы, сложные вирусы, в частности, коронавирусы;

– биоаугментация – внесение непосредственно в очищаемую воду биопрепаратов, содержащих микроорганизмы, способствующие расщеплению загрязняющих веществ. Генетически модифицированные микроорганизмы обладают способностью восстанавливать почву, грунтовые воды и активированный ил, загрязненные различными токсичными веществами, благодаря их улучшенным деградационным способностям [Allan Soo et al., 2024]. Технология подходит для аварийной очистки естественных водоемов, но может влиять на их экосистему и не годится для получения питьевой воды;

– мембранная биоаугментация – гибридная технология, которая сочетает биологическую очистку сточных вод с использованием активного ила и механическую фильтрацию с помощью мембран, что позволяет получить активный ил для повторного использования и чистую воду. Такая интеграция позволяет эффективно удалять как растворенные органические вещества, так и мельчайшие взвешенные частицы, обеспечивая высококачественную очистку;

– анаммокс (аноксидное окисление аммония) – одна из новых технологий для экономически эффективного удаления азота из сточных вод, которая активно внедряется в практику очистки сточных вод от азота по всему миру [Rui Du et al., 2019];

– искусственное болото (биоплато) – экологически чистый метод удаления загрязняющих веществ из сточных вод, который применяется к городским сточным водам, стокам нефтеперерабатывающих заводов, дренажу сельского хозяйства, кислых шахт и т.д. Предполагается [Hassan et al., 2021], что в ближайшем будущем искусственные болота не только будут очищать сточные воды, но и смогут привести к повышению плодородия почвы, созданию пояса для защиты сельскохозяйственных земель от ливневых стоков, станут местом обитания птиц и водных животных и т.д.;

– новые технологии производства биогаза. Биогаз вырабатывается в процессе анаэробного брожения биомассы практически любого органического сырья. Для этого отходы помещают в реактор биогазовой установки и создают необходимые условия. Получение биогаза полностью безотходно – на выходе получают два продукта: собственно газ и биоудобрения.

Предложенный перечень можно продолжать. Каждая технология обладает определенными преимуществами и ограничениями по стоимости, эффективности, доступности, воздействию на окружающую среду и т.д. Ни один подход не является универсальным, необходимо сочетание различных процессов.

В России тоже используются инновационные технологии очистки, но пока они имеют ограниченное распространение. Так, ввод в эксплуатацию биологических очистных сооружений Уфимского нефтеперерабатывающего комплекса²¹,

²¹ URL: <https://neftegaz.ru/news/ecology/641339-ochistnye-sooruzheniya-bashneftipererabotali-65-mln-m3-stochnykh-vod-s-momenta-zapuska/> (дата обращения: 14.04.2025).

в основе которых – мембранный биореактор, позволил в 2,5 раза увеличить объем повторно используемой очищенной воды в технологических процессах и снизить объем забора воды из р. Белая. Внедрение мембранных реакторов началось и крупнейшими водоканалами, такими как ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», АО «Мосводоканал». Биогазовая технология находится на стадии становления: разработано несколько установок, открыты первые биогазовые станции [Киргизбаев и др., 2021]. АО Мосводоканал²² еще в 2009 г. начал эксплуатацию теплоэлектростанции, работающей на биогазе.

Барьеры для биотехнологий

Более широкому распространению передовых технологий очистки препятствуют различные факторы, которые можно объединить в несколько групп.

Институциональные барьеры касаются прежде всего организации мониторинга и контроля, регулирования и обеспечения взаимодействия различных заинтересованных сторон.

- В области мониторинга – недостаточный надзор за нарушениями природоохранного законодательства, особенно в части сброса загрязненных стоков в водоемы. В крупных городах централизованные системы водоподготовки и водоотведения справляются с очисткой бытовых стоков и воды, поступающей в систему питьевого водоснабжения, однако стоки, которые осуществляются предприятиями и поселениями вне системы горводоканалов, часто не отслеживаются и не контролируются. Именно они формируют случаи высоких и сверхвысоких загрязнений.

- Нет эффективного экономического механизма, стимулирующего субъекты хозяйствования сокращать выбросы и сбросы загрязняющих веществ в окружающую среду; штрафы как основной инструмент мотивации предприятий к сокращению объемов и очистке стоков не выполняют свою функцию. Оплата экологического ущерба нередко выглядит для компаний экономически более выгодной, чем экологическая модернизация [Некрасова, Крючихина, 2012].

- Отсутствие у лиц, принимающих решения на регуляторном уровне, приверженности к принятию комплексной политики управления водными ресурсами и сточными водами. Национальный проект «Чистая вода» (часть проекта «Экология») выведен из зоны ответственности Минприроды и передан в Минстрой. В то же время проекты «Чистая Волга» и «Чистый Байкал» остаются в ведении Минприроды.

- В ряде случаев административные требования к обращению с отходами, например, птицефабрик и других пищевых производств, варьируются от запрительно строгих до невыполнимых: нормативы очистки, действовавшие до 2020 г., основывались на цифрах предельно допустимых концентраций (ПДК)

²² Сайт АО Мосводоканал. Альтернативные источники энерго- и теплоснабжения. URL: <https://www.mosvodokanal.ru/sewage/newtechnologies/alternativesources.php> (дата обращения: 14.04.2025).

загрязняющих веществ, соответствующих качеству воды в рыбохозяйственных водоемах. Для большинства небольших предприятий и поселений эти нормы были недостижимы. Для выполнения новых нормативов²³, по мнению экспертов, потребуется реконструкция имеющихся сооружений биологической очистки [Данилович и др., 2020].

° Отсутствие единой методики оценки эффективности создания и деятельности очистительных систем, в результате чего в экспертных заключениях можно наблюдать²⁴:

- разброс удельной стоимости объектов от 3 до 30 раз;
- значительные и часто необоснованные расхождения фактической и проектной производительности, приводящие к многократному завышению затрат на создание объекта;
- существенные различия в стоимости приобретаемого оборудования, связанные как с местом его производства, техническим уровнем, так и с субъективными факторами;
- отсутствие четких представлений у органов государственного управления и экспертизы о стоимости многих видов оборудования.

Основные экономические барьеры:

- высокий износ строительных конструкций и технологического оборудования систем водоотведения (около 80%) и низкие темпы их обновления (1–2% в год)²⁵ ограничивают возможности использования новых технологий;
- высокая стоимость очистных сооружений и технологий очистки и низкая рентабельность работы организаций в области водоотведения. При описании наилучших доступных технологий²⁶ выделяются факторы, влияющие на возможность реализации предлагаемых технологических решений, в подавляющем большинстве случаев это величина капитальных вложений и эксплуатационных затрат;
- недостаток собственных средств у предприятий водоснабжения и водоотведения не только для долгосрочных инвестиций в технологическое развитие, но и для модернизации имеющихся мощностей. Снижение инвестиционных возможностей предприятий в результате отставания роста тарифов от темпов роста инфляции. Организации водоснабжения и водоотведения являются в целом

²³ Постановление Правительства РФ от 15 сентября 2020 г. № 1430 «Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов».

²⁴ Там же.

²⁵ Торба А. Центральное водоотведение: стране нужна федеральная программа очистки стоков // Строительная газета. 06.02.2023.

²⁶ Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 10–2019. Очистка сточных вод по наилучшим доступным технологиям с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. Москва, Бюро НДТ, 2019. 434 с.

убыточными. По оценкам ЦСР²⁷, для поддержания работоспособности оборудования к 2035 г. потребуются увеличение тарифов в 3 раза (водоснабжение) и 1,5 раза (водоотведение);

– дефицит персонала с необходимым уровнем компетенций. Для того чтобы работать с биотехнологиями, персонал промышленных и коммунальных предприятий должен обладать специальными знаниями. Это касается внедрения любых инновационных технологий, но работа с химическими, биоактивными веществами сопряжена с повышенными рисками.

Затраты и выгоды от использования биотехнологий при очистке сточных вод

Вода – самый эксплуатируемый ресурс в мире, который всегда недооценивался. Даже оценить затраты на управление водоотведением не просто, но еще более сложная задача – оценка выгод от сбора, очистки, возможностей повторного использования. Необходимо принимать во внимание не только прямой экономический эффект, но и всю совокупность ценностей, которые связаны с водой: здоровье людей, благополучие будущих поколений, сохранение биоразнообразия, здоровье пресноводных экосистем, включая их культурное и духовное значение, и др. Именно такой подход предлагается Всемирным фондом дикой природы²⁸, который оценил общую выгоду от прямого и косвенного использования пресной воды в 2021 г. примерно в 58 трлн долл. США, что эквивалентно 60% мирового ВВП.

При выборе региональной (национальной) стратегии восстановления ресурсов предлагается сложный многокритериальный подход, в котором выбор приоритетной технологии оценивается не только с позиции стоимости самой технологии, но и ряда других показателей, в том числе объема потенциального рынка водопользования, накопленных возможностей внешней среды и так далее [Renfrew et al., 2022].

Тем не менее правительства и компании в подавляющем большинстве склонны сосредотачиваться на немедленной выгоде, часто игнорируя более широкие оценки, что, безусловно, влияет на принятие ими решений. К тому же непосредственные затраты, связанные с созданием или модернизацией очистных сооружений и их обслуживанием подсчитать гораздо проще, тогда как оценить в терминах денежных потоков результаты применения очень трудно: они распределены во времени, часто имеют отложенные проявления, а также множественные характеристики, из которых далеко не все поддаются оценке.

²⁷ Фонд «Центр стратегических разработок» (ЦСР). Сфера водоснабжения и водоотведения в России: текущее состояние и пути развития. 2024. URL: <https://www.csr.ru/upload/iblock/f1e/e6706jxusj9j3tja2yhtcvsd7as6ewm.pdf> (дата обращения: 20.04.2025).

²⁸ World Wide Fund For Nature (WWF) (2023). The High Cost of Cheap Water: The True Value of Water and Freshwater Ecosystems to People and Planet. Gland, Switzerland, WWF. www.worldwildlife.org/publications/high-cost-of-cheap-water-the-true-value-of-water-and-freshwater-ecosystems-to-people-and-planet. С. 7

Экономические оценки затрат и эффектов использования биотехнологий в сфере водоочистки сегодня опираются на данные отдельных проектов, в них используются различные показатели, что не позволяет считать использованные подходы и методы достаточно обоснованными для широкого применения. В российском Справочнике по наилучшим доступным технологиям²⁹ для экономической оценки предлагается использовать показатель *эколого-экономической эффективности затрат жизненного цикла* (от создания до демонтажа), отнесенные к экологическому результату, то есть к снижению величины интегрального показателя качества очистки [Данилович и др., 2020]. Концепция, заложенная в Справочнике, заключается в распределении ограниченных финансовых ресурсов для обеспечения базовых эффектов, а не создания инновационных технологий.

Приведем несколько характеристик реализованных проектов применения биотехнологий в России, по которым можно судить об эффектах предложенных и используемых технологий (отметим, что речь идет именно об эффектах, а не об эффективности как соотношении затрат и результатов). В таблице 2, составленной по данным компаний-поставщиков, названы объекты, на которых применялись биотехнологии, а также выделены некоторые результаты их использования (экономический, экологический, социальный).

Приведенные примеры демонстрируют заметные преимущества использования биотехнологий для очистки сточных вод, что выражается не только в сокращении загрязнений и в снижении эксплуатационных затрат и штрафов, но и в повышении качества жизни местного населения. Безусловно, для более обоснованных оценок эффективности требуются дальнейшие исследования, но даже немногочисленные примеры дают основание высоко оценить потенциал биотехнологий в обезвреживании загрязнений водных ресурсов.

В заключение отметим, что физические, химические и биологические виды очистки сточных вод широко используются в разных сочетаниях для очистки различных типов стоков. Современные тренды циркулярной экономики направлены на максимально полную очистку сточных вод, извлечение из них ценных материалов и возвращение очищенных водных ресурсов в пользовательский оборот (бытовой, промышленный сельскохозяйственный и пр.).

²⁹ Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 10–2019. Очистка сточных вод по наилучшим доступным технологиям с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. Москва, Бюро НДТ, 2019. 434 с.

Таблица 2. Примеры оценок эффективности использования биотехнологий для очистки стоков

Объект	Поставщик решений	Биотехнология очистки	Эффект		
			экономический	экологический	социальный
15 станций очистки, в том числе 10 олимпийских объектов в Сочи	ЗАО «Компания 'ЭКОС'», исследования, выполненные в ИНМИ РАН	Анаммокс – технология, новая для России	Снижение эксплуатационных затрат на 47%; снижение платы и штрафов за сброс загрязненных стоков; снижение налога на землю	Снижение загрязнения поверхностных вод, восстановление рыбных ресурсов, сохранение природной среды	Снижение заболеваемости, улучшение условий и продолжительности жизни, благоприятное эстетическое восприятие населением комплекса очистных сооружений
Проект Мегаллис (г. Железнодорожный)	ЗАО «Компания 'ЭКОС'», исследования в ИНМИ РАН		Капитальные затраты почти в 2 раза меньше стоимости «классической» станции очистки	Сокращение санитарно-защитной зоны очистных сооружений	Увеличение площадей, доступных для рекреации
Мясоперерабатывающее предприятие с бойней и фермой		Биопрепараты импортные. Нитрификация и денитрификация	Снижение/отсутствие штрафов за сброс стоков с превышением ПДК	Снижение загрязнения водных объектов и почвы	Повышение качества жизни местного населения, увеличение площадей, доступных для рекреации
Табачная фабрика	Компания «Биозим»		Затраты составили 990 евро	Снижение загрязнений в стоках в 6–10 раз	
Свинокомплекс		Нитрификация и денитрификация	Снижение штрафов за превышение концентраций загрязняющих веществ примерно в 20 раз больше ежегодных расходов на биопрепарат	Снижение загрязнений в стоках в 10 раз Стабильность работы очистных сооружений, в т.ч. в холодную погоду	Устраняет неприятный запах

Источник. Сайты компаний «Биозим». URL: https://biozim.ru/Biotehnologii_ochistki_stochnyh_vod, ЗАО «Компания 'ЭКОС'»: URL: <https://www.ecosgroup.com/press/articles/anammoks-technology/>

Современные биотехнологии не просто относятся к числу наиболее щадящих и экологичных методов очистки, они обладают потенциалом превращения отходов в доходы и потому перспективны для развития циркулярной экономики. Однако многие эксперты полагают, что наибольшую эффективность имеют комбинированные системы водоочистки, включая разные виды облучения и фильтрации.

К числу основных недостатков биотехнологических методов относятся высокие затраты на внедрение, что может стать серьезным препятствием не только для малых предприятий, но и для крупного бизнеса. Кроме того, для обслуживания соответствующего оборудования необходим персонал, обладающий специальными компетенциями.

Опыт развитых стран в применении биотехнологий для очистки сточных вод показывает значимость участия государства в стимулировании и финансировании их разработки и внедрения. В России важными аспектами проводимой государством политики водопользования должны стать: поддержка исследований и разработок в области биотехнологий для водоочистки; увеличение инвестиций в строительство и модернизацию очистных сооружений и системы водоотведения как в крупных городах, так и в небольших поселениях, в том числе с использованием механизмов государственно-частного партнерства; расширение спектра инструментов финансовой поддержки строительства/модернизации систем водоотведения; поддержка мероприятий, направленных на информирование и увеличение знаний предприятий, населения и регулирующих органов о возможностях биотехнологий в области очистки стоков.

Важно помнить, что забота об окружающей среде должна быть приоритетной задачей для государства, бизнеса, общественных структур, домохозяйств, и только совместными усилиями возможно обеспечить создание циркулярной экономики и устойчивое развитие нашей планеты.

Литература / References

- Вайцель А.А. Механические методы очистки сточных вод // Наука, образование и культура. 2019. С 2047–2048.
- Weitzel, A.A. (2019). Mechanical methods of wastewater treatment. *Science, Education and Culture*. Pp. 2047–2048. (In Russ.).
- Байгильдиев Т.М., Черемухин А.Г., Волокитин А.И. Современные методы обеззараживания сточных вод: выбор наиболее эффективной и экологичной технологии // НДТ (Наилучшие доступные технологии). 2025. № 2.
- Baigildiev, T.M., Cheremukhin, A.G., Volokitin, A.I. (2025). Modern methods of wastewater disinfection: choosing the most effective and environmentally friendly technology. *BAT (Best Available Technologies)*. No. 2. (In Russ.).
- Вертинский А.П. Современные методы очистки сточных вод: особенности применения и проблематика // Инновации и инвестиции. 2019. С. 175–182.
- Vertinsky, A.P. (2019). Modern methods of wastewater treatment: application features and problems. *Innovations and Investments*. Pp. 175–182. (In Russ.).

- Данилович Д.А., Будницкий Д.М., Новиков А.В. Переход на технологическое нормирование сбросов городских очистных сооружений: итоги десяти лет работы и рекомендации после принятия полного пакета нормативных правовых актов // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2020. № 11.
- Danilovich, D.A., Budnitsky, D.M., Novikov, A.V. (2020). Transition to technological regulation of discharges from urban treatment facilities: results of ten years of work and recommendations after the adoption of a full package of regulatory legal acts. *Water Supply and Sanitary Engineering*. No. 11. (In Russ.).
- Киргизбаев А.А., Фарухшина Р.Р., Муратова В.И. Оценка возможности получения биогаза при утилизации осадков очистных сооружений города Уфы // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2021. № 2–3. С. 52–55.
- Kirgizbaev, A.A., Farukhshina, R.R., Muratova, V.I. (2021). Possibility evaluation of obtaining biogas during the disposal of sediments of treatment facilities in Ufa. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, No. 2–3. Pp. 52–55. (In Russ.).
- Некрасова Т.П., Крючихина А.Е. Экономическая эффективность применения системы очистки сточных вод // *π-Economy*. 2012. № 2–1 (144).
- Nekrasova, T. P., Kryuchikhina, A. E. (2012). Economic efficiency of using a wastewater treatment system. *π-Economy*. No. 2–1 (144). (In Russ.).
- Allan, Soo, Jungbin, Kim, Ho Kyong, Shon (2024). Technologies for the wastewater circular economy – A review. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 317.
- Beya, C.L., Kanwugu, O.N., Ivantsova, M.N. (2022). Modern biotechnological methods in wastewater treatment: a review. *Chimica Techno Acta*. Vol. 9(2), No. 202292S3, 2411–1414; DOI: 10.15826/chimtech.2022.9.2.S3
- Dare, Anne E., Rabi H. Mohtar, Chad T. Jafvert, Basem Shomar, Bernard Engel, Rachid Boukchina, and Ayman Rabi (2017). Opportunities and challenges for treated wastewater reuse in the West Bank, Tunisia, and Qatar. *Transactions of the ASABE* 60 1563–1574.
- Dhananjay Singh, Deepak Singh, Vinay Mishra, Jyoti Kushwaha, Mukul Sengar, Shishir Sinha, Sunita Singh, Balendu Shekher Giri (2024). Strategies for biological treatment of waste water: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 454, 15 May. 142266.
- Hassan, I., Chowdhury, S., Prihartato, P., & Razzak, S. (2021). Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future Potential. *Processes*, 9(11), 1917.
- Lin, L, Yang, H and Xu, X (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Frontiers in Environmental Science*. 10:880246. DOI: 10.3389/fenvs.2022.880246
- Nielsen, Per Halkjær (2017). Microbial biotechnology and circular economy in wastewater treatment. *Microbial Biotechnology*. 10(5), 1102–1105. DOI:10.1111/1751–7915.12821
- Renfrew, V. Vasilaki, A. McLeod, A. Lake, S. Danishvar, E. Katsou (2022). Where is the greatest potential for resource recovery in wastewater treatment plants? *Water Research*. Vol. 220, 15 July. 118673.
- Rui, Du, Yongzhen, Peng, Jiantao, Ji, Liangliang, Shi, Ruitao, Gao, Xiangchen, Li. (2019). Partial denitrification providing nitrite: Opportunities of extending application for anammox. *Environment International* 131. 1050.
- Shravan, J.S., Matsakas, L., Sarkar, O. (2024). Advances in Biological Wastewater Treatment Processes: Focus on Low-Carbon Energy and Resource Recovery in Biorefinery Context. *Bioengineering* (Basel). Mar 16;11(3):281.

Wilkinson, J.L., Voxall, A.B. A., Kolpin, D. W. et al. (2022). Pharmaceutical pollution of the world's rivers. *Proceedings of the Natural Academy of Sciences (PNAS)*, Vol. 119, No. 8.

Статья поступила 02.10.2024

Статья принята к публикации 05.12.2024

Для цитирования: *Кравченко Н.А., Исаева Н.А.* Возможности биотехнологий в развитии циркулярной экономики: очистка сточных вод // ЭКО. 2025. № 3. С. 227–243. DOI: 10.30680/ECO0131–7652–2025–3–227–243

Информация об авторах

Кравченко Наталья Александровна (Новосибирск) – доктор экономических наук, профессор. Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН. E-mail: natakavchenko20@mail.ru; ORCID: 0000–0002–6613–7582

Исаева Надежда Александровна (Новосибирск) – кандидат экономических наук, доцент. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет. E-mail: isanad@mail.ru

Summary

N.A. Kravchenko, N.A. Isaeva

Biotech Opportunities for Development of Circular Economy: Wastewater Treatment

Abstract. The authors analyze the potential of biotechnology in circular economy development applied to water use, namely, treatment of used (polluted) water effluents. The paper considers the state of the problem in Russia; the main technologies used in this sphere; emphasizes the role, prospects and advantages of biotechnology in wastewater treatment systems; highlights the main institutional and economic barriers preventing their wider application. The authors summarize the main approaches to the economic evaluation of costs and benefits of biotechnologies in wastewater treatment.

Keywords: *biotechnology; wastewater treatment; circular economy; wastewater treatment technologies; cost-benefit assessment*

For citation: Kravchenko, N.A., Isaeva, N.A. (2025). Biotech Opportunities for Development of Circular Economy: Wastewater Treatment. *ECO*. No. 3. Pp. 227–243. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131–7652–2025–3–227–243

Information about the authors

Kravchenko, Nataliya Aleksandrovna (Novosibirsk) – Doctor of Economic Sciences. Institute of Economics and Industrial Engineering, SB RAS.

E-mail: natakavchenko20@mail.ru; ORCID: 0000–0002–6613–7582

Isaeva, Nadezhda Aleksandrovna (Novosibirsk) – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor. Novosibirsk State University.

E-mail: isanad@mail.ru