

UDC 60:338.1.014.2

Володимир Єрохін, Максим Стець

## ІНТЕГРАЦІЯ БІОТЕХНОЛОГІЙ У ЦИРКУЛЯРНУ ЕКОНОМІКУ



Volodymyr Yerokhin, Maksym Stets

## INTEGRATION OF BIOTECHNOLOGY INTO THE CIRCULAR ECONOMY

DOI: 10.58407/bht.2.24.8

## АНОТАЦІЯ

**Мета.** У статті підкреслюється важливість дослідження через ефективність та репрезентативність інтеграції біотехнологій в циркулярну економіку, оскільки вони забезпечують реалізацію нелінійного підходу, який сприяє додатковому прибутку і захищає довкілля від екологічних катастроф.

**Методологія.** Використані методи включають: а) біодеградацію та біорозкладання із застосуванням біоматеріалів, таких як органічні відходи, біополімери та біопластик, що вивчаються за допомогою біохімічних тестів, мас-спектрометрії та молекулярно-біологічних методів; б) біосинтез та біопереробку із використанням живих організмів, таких як бактерії, гриби та водорості, що піддаються генетичній модифікації для підвищення їх продуктивності та стійкості; в) біоремедіацію для дослідження біоматеріалів і мікроорганізмів, що очищують забруднені ділянки, використовуючи високоефективну рідинну хроматографію та молекулярно-генетичні методи для оцінки ефективності та екологічної безпеки; г) біоінженерію, яка включає високопродуктивні методи редагування геному.

**Наукова новизна.** Стрижневі засади функціонування циркулярної економіки включають відновлюваність (ремонт та повторне використання продуктів), диференціацію (вибір матеріалів, розклад яких є швидшим і безпечнішим), екологізм (використання джерел «чистої» енергії, що підвищують стійкість систем) і культурологізм (поширення екологічної парадигми для зміни споживчої поведінки).

**Висновки.** Інтеграція біотехнологій в циркулярну економіку має особливу важливість у контексті поточної екологічної ситуації та необхідності впровадження нелінійної економіки, яка відповідає сучасній культурі споживання. Основними перспективами є удосконалення існуючих методів, інноваційні рішення та міждисциплінарні підходи. Подальші дослідження мають бути зосереджені на вдосконаленні процесів біодеградації та впровадженні нових матеріалів, що сприятиме інтенсифікації взаємодії між науковими установами, промисловими компаніями та іншими учасниками. Біотехнології в контексті циркулярної економіки мають значний потенціал для сталого розвитку, захисту довкілля та інтенсифікації наукового прогресу через розробку нових методологій, технік та інтегративних наукових проектів.

**Ключові слова:** біотехнології, циркулярна економіка, лінійна економіка, нелінійна економіка, біоремедіація, біосинтез, біодеградація, біорозкладання, біопереробка, біоінженерія

## ABSTRACT

**Objective.** The article emphasises the importance of the study because of the effectiveness and representativeness of the integration of biotechnology into the circular economy, as it provides a non-linear approach that promotes additional profits and protects the environment from environmental disasters.

**Methodology.** The methods used include: a) biodegradation and biodecomposition using biomaterials such as organic waste, biopolymers and bioplastics, which are studied using biochemical tests, mass spectrometry and molecular biological methods; b) biosynthesis and biorefining using living organisms such as bacteria, fungi and algae, which are genetically modified to increase their productivity and sustainability; c) bioremediation for the study of biomaterials and microorganisms that clean up contaminated sites, using high-performance liquid chromatography and molecular genetic methods to assess efficacy and environmental safety; d) bioengineering, which includes high-throughput genome editing methods.

**Scientific novelty.** The core principles of the circular economy include renewability (repair and reuse of products), differentiation (selection of materials whose decomposition is faster and safer), environmentalism (use of clean energy sources that increase the sustainability of systems) and culturalism (spreading the environmental paradigm to change consumer behaviour).

**Conclusions.** The integration of biotechnology into the circular economy is of particular importance in the context of the current environmental situation and the need to introduce a non-linear economy that meets the modern culture of

consumption. The main prospects are the improvement of existing methods, innovative solutions and interdisciplinary approaches. Further research should focus on improving biodegradation processes and introducing new materials, which will help to intensify interaction between academic institutions, industrial companies and other stakeholders. Biotechnology in the context of the circular economy has significant potential for sustainable development, environmental protection, and intensification of scientific progress through the development of new methodologies, techniques, and integrative research projects.

**Key words:** biotechnology, circular economy, linear economy, nonlinear economy, bioremediation, biosynthesis, biodegradation, bio-processing, bioengineering

## Вступ

Проблема інтеграції біотехнологій у циркулярну економіку є доволі широкою, оскільки її динаміка корелює з диджиталізаційними процесами (зокрема – з екстраполяцією математичної парадигми до гуманітарних досліджень, тенденціями до кумулювання в сучасних наукових дослідженнях (як гуманітарних, так і природничих) інформаційних технологій тощо). Своєю чергою, останні лімітовані й детерміновані специфікою циркулярної економіки, яка є альтернативною економічною моделлю, базованою на актуалізації певних замкнених циклів в процесах виробництва, обігу та споживання (Circular economy model, 2024).

Біотехнології продуктивні й репрезентативні щодо вищезазначеного виду економіки, оскільки вони дозволяють реалізувати покладений у ній нелінійний підхід. Останній відрізняється від класичного лінійного, для якого притаманний незамкнений цикл, у межах якого використання продукту має певну етапність («придбання – використання – утилізація»). Натомість циркулярна економіка актуалізує інший підхід, продукуючи отримання додаткового прибутку (на відміну від «одноразового» вищезазначеного).

Таким чином, у межах циркулярної економіки актуалізовано такі детермінанти: а) *відновлювальність* – можливість ремонту й повторного використання навіть після завершення запланованого терміну придатності; б) *диференціація* – виявляється у підборі для використання тих матеріалів, розклад яких буде безпечним для навколишнього середовища; в) *екологізм* – використання джерел «чистої» енергії, які, своєю чергою, дозволяють підвищити стійкість систем та знизити залежність від ресурсних коливань; г) *культурологізм* – продукування розвитку тематичних норм, рухів, ідеологій тощо, які культивують видозміну споживацької поведінки: оренди замість придбання, спільного використання замість одноосібного тощо.

Неоднозначність, самотність та особлива динаміка функціонування аналізованої проблематики репрезентована у низці досліджень, у яких вивчено її побутування. Так, вищезазначена нова культура споживання яскраво висвітлена у праці Abdullah et al. (2024), у якій автори репрезентують концепцію спільного виробництва біоенергії з відновленням довкілля, аналізуючи низку її трансформаційних змін. Вчені вбачають реалізацію останньої у ідеї інтегрованого водоростево-олійнопального біопереробного заводу як економічно ефективного та інноваційного рішення для вирішення проблеми взаємозв'язку між кліматом, енергією, продовольством, водою, циркулярною економікою та сталим виробництвом енергії, а також розробкою біопродуктів.

Безпосередньо перспективи інтеграції біотехнологій щодо побутування циркулярної економіки представлено у праці (Begum et al., 2024). У ній автори стверджують, що перехід від вищезазначеної лінійної моделі економіки до циркулярної засвідчує продуктивність використання біогазових установок та біопереробних заводів у довгостроковій перспективі. Вчені підкреслюють, що актуалізація останньої позначена перетворення відходів на біоенергію, біодобрива та інші продукти з доданою вартістю з метою їх сировинної актуалізації у промисловості.

Singh et al. (2024) репрезентують своє розуміння циркулярної економіки як цілісного підходу, спрямованого на створення стійкої та відновлюваної економічної системи, яка мінімізує відходи, сприяє ефективному використанню ресурсів та збереженню навколишнього середовища. Відтак, на думку авторів, біотехнологія продуктивна щодо використання корисних мікробів, ставши фундаментальним підходом до розвитку циркулярної економіки. Дослідники вивчають, як корисні мікроби, отримані за допомогою точної біотехнології, відіграють ключову роль у трансформації

різних секторів економіки, просуваючи сталі практики, покращуючи використання ресурсів та сприяючи більш стійкому та екологічному майбутньому.

Під кутом Індустрії 4.0 репрезентують Duong Thi Binh et al. (2024) аналізовану проблематику: так, авторами здійснено комплексний огляд літератури (1998–2023 рр., 232 праці), що виявив стрижневі тенденції, лакуни в наявних дослідженнях. Вчені стверджують, що результатом вищезазначеного стала розробка всеосяжної теоретичної бази для Індустрії 4.0, спрямованої на сприяння сталості в межах циркулярної економіки, що охоплює економічні, соціальні та екологічні виміри. Дослідники підкреслюють, що вищезазначена робота засвічує зростаючий ентузіазм щодо використання інструментів Індустрії 4.0 (Інтернет речей, блокчейн тощо) для покращення управління якістю в операціях циркулярного ланцюга поставок.

Виклики та можливості моделі біоциркулярно-зеленої економіки щодо актуалізації у аргарному секторі висвітлено у праці (Jaroenkietkajorn et al., 2024) Автори розглядають теорію, концепції, підходи та інструменти оцінки сталості, що інтегрують продукти з доданою вартістю, які лежать в основі вищезазначеної моделі. Вчені репрезентують самобутність актуалізації досліджуваної моделі щодо сільськогосподарських ланцюгів доданої вартості, а також висвітлюють розроблену ними систему оцінки сталого розвитку. Дослідники акцентують увагу на потенціалі сільськогосподарських ланцюгів доданої вартості, який може бути посилений за допомогою концепції біорефінансування.

Обговорення механізму біоремедіації стічних вод шкіряної промисловості на основі моделі циркулярної економіки як стратегії очищення представлено у праці (Montalvo-Romero et al., 2024). У аналізованій праці автори акцентують увагу на тому, що забруднення, спричинене скидами стічних вод шкіряної промисловості, спричиняє різні захворювання та негативно впливає на флору і фауну. Вчені представляють біоремедіацію біотехнологічним підходом, здатним усунути токсичні забруднювачі, наслідком цього є надання переваги вищезазначеним процесам перед іншими, оскільки вони є дружніми та неінвазивними

для довкілля. Дослідники підкреслюють, що саме біоремедіація є стратегією, яка дозволяє відновлювати очищену воду для різних цілей, акцентуючи на її спрямованості на управління токсичними речовинами та забруднюючими процесами.

Процесу Фішера-Трошпа (далі – ФТ), який трансформує вугілля, біомасу або природний газ на рідкі вуглеводні шляхом утворення синтез-газу та каталітичної конверсії присвячено працю (Moreroa et al., 2024). У ній автори досліджують потенціал моделі циркулярної економіки як стратегії сталого управління стічними водами для поводження зі стічними водами ФТ. Вчені вивчають меліоративні заходи для подолання обмежень одного методу біологічного очищення – анаеробного зброджування стічних вод – шляхом вивчення комбінації додавання поживних речовин, мікробіологічного збагачення та збагачення за рахунок інтеграції відходів, отриманих з інших промислових секторів, як ключових для впровадження моделювання циркулярної економіки в оцінці вартості стічних вод ФТ.

Аналіз глибокого впливу забруднення води на екосистеми та здоров'я людини, а також вивчення інноваційних стратегій для ефективного очищення стічних вод представлено у праці (Trivedi et al., 2024). У аналізованій праці автори зазначають, що традиційні методи очищення, хоча й обмежені, створюють підґрунтя для обговорення новітніх технологій, таких як металоорганічні каркаси, лужно-активовані матеріали, молекулярна біологія та фіторемедіація. Вчені підкреслюють, що вищезазначені новаторські підходи обіцяють економічно ефективно, екологічно чисте очищення стічних вод у поєднанні з вилученням цінних сполук. Дослідники акцентують увагу на тому, що інтеграція цих рішень у практику сприяє створенню циркулярної біоекономіки, оптимізації використання ресурсів та зменшенню впливу на довкілля. Таким чином, ця праця репрезентативна щодо шляху до сталого зменшення забруднення води та максимізації ресурсів у світі, що стрімко розвивається.

Вивчення можливостей використання мінеральних субстратів, які лишаються у гірських породах після процесів біоекстракції, для вирощування сільськогосподарських культур представлено у праці (Sobral et al.,

2024). Автори зазначають, що такі залишки є природним методом удобрення, у межах якого відбувається збільшення використаних поживних речовин, необхідних для виробництва продуктів харчування, у ґрунтах, виснажених вивітрюванням/вилуговуванням або невідповідним та інтенсивним використанням хімічних добрив, не впливаючи на баланс довкілля. Дослідники підкреслюють, що існує потреба в технології відновлення елементів з електронного брухту, враховуючи, що деякі з них також використовуються як мікроелементи для людини, особливо з огляду на короткий термін служби сучасного електронного обладнання.

Розгляд аналізованої проблематики у розрізці нанотехнологій, які революціонізують сільськогосподарські та харчові відходи у слаборозвинених країнах завдяки застосуванню принципів сталого сільського господарства та циркулярної економіки, представлено у праці (Preethi et al., 2024). Автори критично оцінюють здатність нанотехнологій вирішувати проблеми управління сільськогосподарськими відходами та використанням ресурсів. Вчені стверджують, що завдяки своїй нанорозмірній специфічній інженерії нанотехнології забезпечують значне підвищення ефективності переробки відходів. Так, за допомогою наноматеріалів і нанопристроїв можна створювати сучасні датчики для моніторингу сільськогосподарських процесів у реальному часі, оптимізації ресурсів і зменшення відходів. Натомість нанокатализатори також перетворюють органічні відходи на біопаливо та сполуки на біологічній основі, підтримуючи циркулярну економіку.

Вивчення ціни продажу біопалива на основі якості (стабільності, ефективності поглинання вуглецю та вмісту важких металів щодо аналізу чистої теперішньої вартості (далі – ЧТВ), ціни беззбитковості продажу продукту та ціни обробки осаду) використані у праці O'Boyle, Mohamed, & Li (2024) для визначення прибутковості спільного піролізу порівняно з піролізом лише осаду стічних вод (далі – ОСВ) й традиційними методами обробки. Вчені вивчають ціни продажу біопалива на основі якості (стабільності, ефективності поглинання вуглецю та вмісту важких металів), які були оцінені на рівні 2,24, 1,44 та

0,98 CAD/кг для біопалива високо-, середньо- та низькосортних сортів. Дослідники підкреслюють, що ціни на останнє, розраховані на основі його вищої теплової здатності біопалива та дизельного палива, й коливалися від 0,80 до 1,22 CAD/кг. Показово, що тирса та пшенична солома були обрані як сировина для спільного піролізу з чотирма співвідношеннями змішування (20, 40, 60 та 80 мас. %). Прикметно, що, на думку авторів, аналіз чутливості показав залежність економічних показників від ринкової вартості біогазу та біопалива, що засвідчує репрезентативність аналізованої праці щодо економічного аналізу такого підходу і поглибив розуміння потенціалу спільного піролізу для виробництва біопалива та біогазу, пропонуючи інноваційні рішення для екологічних проблем утилізації ОСВ.

Отже, аналіз історіографії з досліджуваної проблематики статті засвідчив самобутність процесу актуалізації біотехнологій у циркулярній економіці, варіативність підходів, методів, практик тощо, виявивши, тим не менш, її лакунізованість. Зокрема, незважаючи на актуальність біотехнологій у контексті побутування циркулярної економіки відзначимо наявність низки прогалин (зокрема, щодо методології та інструментарію). Останнє пояснюване в контексті неусталеності природи побутування біотехнологій, що, своєю чергою, продукує принципову відкритість практики їх використання. Вищезазначене, природно, визначає спрямованість нашої роботи на узагальнення підходів до аналізованої проблематики щодо вибудовування її аналізу й методології.

*Метою* статті є вивчення можливостей та переваг інтеграції біотехнологій у циркулярну економіку з метою створення сталого та ефективного використання ресурсів і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. *Гіпотезою* – інтеграція біотехнологій у циркулярну економіку може сприяти зниженню відходів, оптимізації використання ресурсів та створенню нових продуктів та матеріалів з використанням біологічних процесів. Вищезазначене може бути досягнуто шляхом використання мікроорганізмів для переробки відходів, біологічного виробництва сировини та біополімерів, а також застосування біоінженерії для покращення

процесів відновлення та використання ресурсів у замкнутому циклі.

### Матеріали і методи дослідження

Побутування сучасного світу детерміноване низкою екологічних проблем й обмежень ресурсної бази, вирішенням яких є циркулярна економіка (Circular economy model, 2024). Остання репрезентована як перспективна парадигма, у межах якої можливе реальне зменшення відходів із паралельною оптимізацією використання ресурсів. Біотехнології виступають найпродуктивнішим інноваційним інструментарієм реалізації останньої, що продукує актуальність вивчення самотності їх інтеграції у її межах. При цьому стрижневими віхами вищезазначеного процесу є такі матеріали й методи:

1. *Біодеградація та біорозкладання* позначені використанням низки біоматеріалів (органічних відходів, біополімерів та біопластики), що досліджують за допомогою біохімічних тестів, мас-спектрометрії та молекулярно-біологічних методів тощо. Останні покликані визначити склад та швидкість певних реакцій (у цьому випадку – швидкість розкладу аналізованих матеріалів) (Abdullah et al., 2024)

2. *Біосинтез й біопереробка*, у процесі яких задіяно широкий спектр живих організмів (бактерії, гриби та водорості), які узвичаєно використовують для виробництва біопалива. Своєю чергою, такі мікроорганізми здебільшого зазнають генетичної модифікації задля підвищення їх продуктивності, а також стійкості до певних (зазвичай, стресових) умов (Begum et al., 2024).

3. *Біоремедіація*, використовується для вивчення біоматеріалів та мікроорганізмів різноманітної природи, які здатні очищувати забруднені ділянки. Серед найпоширеніших методів дослідження – аналітичні (високоєфективна рідкісна хроматографія та низка молекулярно-генетичних, які допомагають визначати ефективність та екологічну безпеку вищезазначених процесів (Montalvo-Romero et al., 2024; Moreroa et al., 2024; Trivedi et al., 2024).

4. *Біоінженерія*, у межах якої задіюють високопродуктивні методи генетичної інженерії, покликані продукувати організми з покращеними властивостями. Методологія роботи включає методи редагування геному (до прикладу, CRISPR-Cas9), які дозволяють

впливати на генетичний склад організмів з метою набуття ними доданої користі в контексті циркулярної економіки (Montalvo-Romero et al., 2024; Sobral et al., 2024).

Вищезазначене засвідчує широкий спектр створення екологічних стійких та ефективних систем використання ресурсів у межах актуалізації біотехнологій у циркулярній економіці. Зокрема, мовиться про експонентне зростання інновацій у вищезазначеній галузі, що продукує потребу у виробленні особливого механізму впливу на сталість та екологічний баланс глобальної економіки.

Природно, що у вищезазначеному стрижневу роль відіграють матеріали і методи дослідження, які є визначальними щодо таких ініціатив. Так, спектр застосування останніх варіюється від аналізу складу матеріалів до розвитку інноваційних технологій біопереробки тощо, що, своєю чергою, продукує вироблення ефективних, ресурсоемних та стійких рішень щодо сучасної екологічної кризи.

### Результати дослідження та їх обговорення

Аналізована проблематика закономірно продукує актуальність обговорення таких положень:

1. *Самотність актуалізації біотехнологій щодо біодеградації відходів*. Дослідження репрезентативні щодо перспектив біотехнологій в контексті трансформацій органічних відходів (сільськогосподарських залишків, харчових відходів) на корисні продукти (біопаливо, біополімери та органічні добрива). Першою чергою, обговорення вищезазначеного включає врахування переваг актуалізації біотехнологій порівняно з традиційними методами переробки відходів (спалювання, сміттєзвалища).

Sobral et al. (2024) зауважують, що останнім часом електронні відходи можуть містити десятки різних елементів, таких як неблагородні метали, дорогоцінні метали, рідкоземельні та деякі важкі метали. Вчені репрезентують можливі шляхи вилучення/переробки цих металів й підкреслюють актуальність біотехнологічного підходу як ефективного способу переробки таких відходів, а також багатьох інших, що скидаються в навколишнє середовище, оскільки природні ресурси доступні в навколишньому середовищі і можуть бути

використані без особливих витрат, як, до прикладу, у випадку з багатьма мікроорганізмами.

Натомість Abdullah et al. (2024) аналізують різні типи біомаси олійної пальми та стічних вод млинів, а також технології відновлення навколишнього середовища за допомогою когенерації чистої/біоенергії на основі біодизеля, біоетанолу, біометану, біоводню, біомасла та авіаційного біопалива з використанням накопичувачів енергії та суперконденсаторів. Автори приділяють особливу увагу перетворенню біомаси та стоків у біополімери, графен, біокомпозити та MXene, а також у біохімічні речовини та для біомедичних застосувань. Вчені детально розглядають важливість використання зелених та екологічно чистих процесів. У своїй праці вони пропонують економічне інтегроване вирощування водоростей у промислових умовах (зокрема, олійних пальм) для застосування в аквакультури з інклюзивними програмами розвитку громад, заснованими на філософії NEESBA, що, на їх думку, суголосно глобальним цілям сталого розвитку.

*2. Ефективна актуалізація мікроорганізмів та генетично-модифікованих організмів.* Полягає у використанні генетичної модифікації задля покращення низки властивостей мікроорганізмів з метою підвищення ефективності обробки біомаси та відходів. Обговорення може включати актуалізацію низки етичних та екологічних аспектів використання генетично-модифікованих продуктів з урахуванням спектра їх кореляцій з довкіллям та здоров'ям людей.

Begum et al. (2024) висвітлюють оптимальне та відповідальне використання ресурсів і розробку технологій відповідно до підходу 3R (Reduce, Reuse, and Recycle). Останнє, на їх думку, суголосно експонентному зростанню рівня переробки та повторного використання відходів, яке наближає систему до концепції циркулярної економіки, що є менш шкідливою для довкілля і прибутковішою. При цьому автори підкреслюють, що на сьогодні циркулярна економіка все ще перебуває на етапі становлення, наслідком чого місце біотехнологій у цьому процесі є несталим. Зокрема, продукція біогазових установок та біорегенераційних заводів знайде свій шлях на світовому ринку в найближчі роки. Так,

гнучкість систем біометанування/біопереробних заводів та їх здатність переробляти різноманітну сировину (органічну) для виробництва широкого спектра продуктів забезпечує роль біогазових установок та біопереробних заводів у циркулярній економіці.

*3. Застосування нанотехнологій у межах біотехнологічних досліджень.* Перспективність вищезазначеного напряму засвідчена низкою переваг застосування наноматеріалів щодо каталітичних властивостей та стабільності біохімічних процесів. Обговорення цього напряму репрезентативне щодо врахування генези потенційних ризиків та переваг використання наноматеріалів у біотехнологічних дослідженнях, а також їх впливу на довкілля.

V. Preethi et al. (2024) фокусуються на точному землеробстві з використанням нанотехнологій, яке підвищує врожайність сільськогосподарських культур, зменшуючи при цьому витрати ресурсів. Вчені стверджують, що цільові та регульовані технології нанорозмірного внесення добрив і пестицидів зменшують вплив на навколишнє середовище й оптимізують використання поживних речовин. Зокрема, наносенсиори в сільськогосподарських системах забезпечують прийняття рішень щодо сталого ведення сільського господарства на основі даних. Таким чином, критична оцінка репрезентативна щодо відповідального та інклюзивного впровадження нанотехнологій у країнах, що розвиваються, та їх соціально-економічних наслідків. У праці запропоновано стратегічну інтеграцію нанотехнологій в аграрний сектор бідних країн для революційної переробки відходів, підвищення ефективності використання ресурсів та впровадження циркулярної економіки.

Окрім того, Duong Thi Binh et al. (2024) репрезентують низку адаптивних стратегій вищезазначеної Індустрії 4.0, які спрямовані на досягнення цілісних цілей сталого розвитку в циркулярній економіці, підкреслюючи наслідки для подальших наукових досліджень у цій динамічній галузі. Вчені зазначають, що задля сприяння диджиталізації управління якістю ланцюгів поставок, зацікавлені сторони цього ланцюга повинні проаналізувати прогалини в дослідженнях і розробити практичні плани впровадження,

використовуючи окреслену методологію, визначивши її основні, сталі компоненти.

4. *Специфіка створення біокомпозитів та біоматеріалів.* Дослідження засвідчують переваги використання біокомпозитів та біоматеріалів, що продукує зменшення залежності від необоротних ресурсів та, як наслідок, сприяє розвитку циркулярної економіки. Обговорення актуалізує переваги використання вищезазначених матеріалів порівняно з узвичаєними полімерами з своєрідним впливом на здоров'я людей та довкілля.

Jaroenkietkajorn et al. (2024) зазначають, що вищезазначена технологія (біорефінансування) становить серйозну проблему для виробництва продуктів з доданою вартістю та інвестиційних витрат. Вчені акцентують увагу на тому, що технічний розвиток процесів збору та зберігання, а також управління логістикою є пріоритетним для належного управління. Дослідники підкреслюють, що розроблена система оцінки сталого розвитку включає три інструменти (оцінка життєвого циклу, оцінка соціального життєвого циклу та аналіз витрат і вигод), які охоплюють усі виміри сталого розвитку. Характерно, що вищезазначені інструменти додатково підтримуються природоорієнтованим рішенням, аналізом матеріальних потоків та екологічним слідом для розгляду питань збереження екосистеми, визначення пріоритетності ресурсів та обмеження екологічного потенціалу відповідно.

Вищезазначені результати актуальні щодо їх значення для розвитку циркулярної економіки, сталого використання ресурсів та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Окрім того, можна розглянути можливі напрями подальших досліджень та актуалізацію цих технологій на практиці.

### **Висновки та перспективи**

Отже, інтеграція біотехнологій у циркулярну економіку має особливу значущість щодо актуальної екологічної ситуації, потреби у нелінійній економіці, що репрезентує сучасну культуру споживання. Так, проведене дослідження підтвердило потенціал біотехнологій щодо створення сталого використання ресурсів та зменшення негативного впливу на довкілля. Природно, що головними перспективами

вищезазначеного є удосконалення наявних методів та технологій, експонентне впровадження інноваційних рішень, нестандартних підходів тощо у практику.

Останнє продумано, незважаючи на досягнуті успіхи, низкою наявних викликів, потреб тощо, які видозмінюються з часом. Так, подальші дослідження аналізованої проблематики доцільно зосередити, окрім вищезазначеної методології та технології, на вдосконаленні процесів біодеградації й впровадженні нових матеріалів у практику роботи. Це, першою чергою, можна досягти інтенсифікацією взаємодії між науковими установами, промисловими компаніями та іншими учасниками.

Такий підхід буде продуктивний, оскільки динамічний обмін знаннями та ресурсами дозволить прискорити впровадження інноваційних рішень, винайдення нових матеріалів та нестандартних підходів. Своєю чергою, вищезазначене створить нові робочі місця і зменшить залежність від необоротних ресурсів та стимулюватиме інновативність цього економічного сектора. Окрім того, такі процеси покращать якість довкілля шляхом зменшення викидів виробництва, наслідком чого стане все менша кількість екологічних катастроф.

Відтак, актуалізація біотехнологій щодо циркулярної економіки має значний потенціал в контексті сталого розвитку, збереження навколишнього середовища та інтенсифікації генези науки загалом. Першою чергою, останню вбачаємо у розробці нової сучасної, базованої на останніх дослідженнях і здобутках, методології, техніках, а також інтегративних наукових проектах, які дозволять у міжпредметному ключі дослідити ту чи ту проблему.

Вищезазначений підхід до моделі циркулярної економіки може допомогти подолати екологічні проблеми, пов'язані з стічними водами, оскільки він сприяє спільному використанню, повторному використанню та переробці ресурсів. Таким чином, принципи циркулярної економіки продуктивні для покращення відновлення ресурсів, переробки та співпраці з іншими промисловими секторами (сільське господарство, гірничодобувна промисловість) та зменшення їхнього впливу на навколишнє середовище, що підтверджує вищезазначену гіпотезу.

**Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement**

Не застосовується / Not applicable.

**Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement**

Не застосовується / Not applicable.

**References**

- Abdullah, M. A., Nazir, M. S., Hussein, H. A., Shah, S. M. U., Azra, N., Iftikhar, R., ... & Hung, Y. T. (2024). New perspectives on biomass conversion and circular economy based on Integrated Algal-Oil Palm Biorefinery framework for sustainable energy and bioproducts co-generation. *Industrial Crops and Products*, 213, 118452. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118452>.
- Begum, S., Juntupally, S., Arelli, V., & Anupoju, G. R. (2024). Waste to biomethane: advent of circular economy. In *Biogas to Biomethane* (pp. 225–242). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18479-6.00007-7>.
- Circular economy model. (2024). Diya Business: website. Retrieved May 06, 2024, from <https://goo.su/SqcR> (in Ukrainian)  
Модель циркулярної економіки. (2024). *Дія Бізнес* : вебсайт. URL: <https://goo.su/SqcR> (дата звернення: 06.05.24).
- Duong Thi Binh, A., Akbari, M., Le Thi Cam, H., Nguyen Canh, L., & Truong Quang, H. (2024). Forging Pathways to Circular Economy Excellence: Integrating Industry 4.0 with Quality Management. *Sustainability*, 16(7), 3053. <https://doi.org/10.3390/su16073053>.
- Jaroenkietkajorn, U., Gheewala, S. H., Mungkung, R., Jakrawatana, N., Silalertruksa, T., Lecksiwilai, N., ... & Nilsalab, P. (2024). Challenges and Opportunities of Bio-Circular-Green Economy for Agriculture. *Circular Economy and Sustainability*, P. 1–22. <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00355-9>.
- Montalvo-Romero, N., Montiel-Rosales, A., Sandoval-Herazo, L. C., & Purroy-Vásquez, R. (2024). Bioremediation of Wastewater from the Tanning Industry Under a Circular Economy Model. In *Nature-based Solutions for Circular Management of Urban Water* (pp. 169–184). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-50725-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-50725-0_10).
- Moreroa, M., Malematja, T. P., & Ijoma, G. N. (2024). Integrating the circular economy model into the management and treatment of Fischer-Tropsch effluents-a conversion of waste to energy (biogas) opportunity. *IET Renewable Power Generation*. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12976>.
- O'Boyle, M., Mohamed, B. A., & Li, L. Y. (2024). Co-pyrolysis of sewage sludge and biomass waste into biofuels and biochar: A comprehensive feasibility study using a circular economy approach. *Chemosphere*, 350, 141074. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141074>.
- Preethi, B., Karmegam, N., Manikandan, S., Vickram, S., Subbaiya, R., Rajeshkumar, S., ... & Govartanan, M. (2024). Nanotechnology-powered innovations for agricultural and food waste valorization: A critical appraisal in the context of circular economy implementation in developing nations. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.100>.
- Singh, R. P., Yadav, P., Kumar, I., Kumar, A., & Gupta, R. K. (2024). Precision biotechnology using beneficial microbes as a fundamental approach to the circular economy. In *The Potential of Microbes for a Circular Economy* (pp. 73–103). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15924-4.00001-1>.
- Sobral, L. G. S., de Aguiar Sobral, L., de Oliveira, A. D. N., Silva, I. G., & de Araujo, P. C. (2024). Mineral-Metal Wastes (Bio)/Recycling: Compliance with Circular Economy. *Biotechnological Innovations in the Mineral-Metal Industry*, P. 229–244. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-43625-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-43625-3_13).



Trivedi, R., Upadhyay, T. K., Khan, F., Pandey, P., Kaushal, R. S., Sonkar, M., ... & Siddique, M. A. B. (2024). Innovative strategies to manage polluted aquatic ecosystem and agri-food waste for circular economy. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 100928. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100928>.

Received: 24.04.2024. Accepted: 30.05.2024. Published: 18.09.2024.

**Ви можете цитувати цю статтю так:**

Єрохін В., Стець М. Інтеграція біотехнологій у циркулярну економіку. *Biota. Human. Technology*. 2024. №2. С. 90-98.

**Cite this article in APA style as:**

Yerokhin, V., & Stets, M. (2024). Integration of biotechnology into the circular economy. *Biota. Human. Technology*, 2, 90-98. (in Ukrainian)

**Information about the authors:**

**Yerokhin V.** [*in Ukrainian: Єрохін В.*] <sup>1</sup>, Postgraduate Student, email: exploser2@gmail.com

ORCID: 0009-0000-0224-8622

Department of Technology of Biologically Active Substances, Pharmacy and Biotechnology, Lviv Politechnic National University

12 S. Bandery Street, Lviv, 79013, Ukraine

**Stets M.** [*in Ukrainian: Стець М.*] <sup>2</sup>, Postgraduate Student, email: stecmaxim@gmail.com

ORCID: 0009-0002-5608-0217

Department of Technology of Biologically Active Substances, Pharmacy and Biotechnology, Lviv Politechnic National University

12 S. Bandery Street, Lviv, 79013, Ukraine

<sup>1</sup> Study design, data collection, manuscript preparation.

<sup>2</sup> Study design, data collection, manuscript preparation.