

СТІЙКІСТЬ ЯК ЗДАТНІСТЬ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ ГЕОСИСТЕМИ ДОЛАТИ НАСЛІДКИ ШКІДЛИВИХ ВПЛИВІВ І ЗМЕНШУВАТИ РИЗИК РУЙНУВАННЯ КОМПАРТМЕНТУ

Бойко Т. Г., Руда М. В., Кучер Л. Ю.

ВСТУП

У будь-якій просторово-часовій геосистемі (ПЧГ), насиченій урбаністичними та іншими комплексами, особливе значення має стійкість цієї геосистеми, як здатність долати антропогенні забруднення. Базовим механізмом регулювання стану геосистеми є екологічна стандартизація, що має на меті встановити такі обов'язкові норми, правила та вимоги щодо стану, використання і гарантування екологічної безпеки ПЧГ, які б не перевищували можливості її саморегуляції і відновлення. Зокрема, є потреба в розробленні і впровадженні науково обґрунтованих критеріїв гранично допустимого шкідливого впливу на геосистему, а також встановлення норм і правил природокористування на основі встановлених критеріїв. Результатом такої діяльності є встановлення кількісних значень складових показника стійкості, які давали б змогу підтримувати антропогенний вплив на ПЧГ в допустимих межах, за яких механізми саморегуляції в поєднанні з природоохоронними заходами забезпечували процес її відновлення і не призводили до деградації.

Проблематикою нормативного забезпечення в екології займалися С. А. Балюк, Ю. Р. Пузаченко, О. Ф. Садиков, Т. Д. Александрова, М. М. Мірошниченко та інші, однак, дотепер не опрацьовані уніфіковані вимоги щодо просторово-часової моделі здатності геосистеми протидіяти шкідливим впливам, відсутня єдина номенклатура складових показника стійкості і науково обґрунтовані підходи до їх визначення, відсутня їх екосистемологічна класифікація та загальноприйняті терміни, зокрема для характеристики властивостей ПЧГ з різноманітними поєднаннями біогеоценозів, відсутні нормовані значення складових показника стійкості ПЧГ тощо, що зумовлює актуальність цього дослідження.

Базовим для становлення і розвитку екологічного нормування можна вважати положення праці¹ про те, що антропогенне спрощення екосистем – це не обов'язково їх деградація, а еволюція в нових умовах,

¹ Gostanza R. Ecological economic issue and consideration in indicator development, selection, and use: toward an operational definition of system health. *Ecological Indicators: Proceeding of an International Symposium*. Florida, 1992. P. 1491–1502.

за якої не всі наслідки спрощення екосистеми є небажаними. Якщо в зміненому людиною середовищі біогеоценоз підтримує себе як систему в оптимальному стані – це означає, що ступінь антропогенного впливу не перевищує його адаптаційних можливостей².

Авторами³ на основі статистичного розуміння норми запропоновано кілька підходів до вимірювання нормальності та стійкості екосистем, що необхідно для визначення її запасу міцності. Подібні погляди про норму екосистем були висловлені західними дослідниками в рамках концепції здоров'я екосистем⁴. Перспективний підхід авторів до визначення допустимості змін в екосистемах полягає в твердженні – якщо порушення в екосистемах під дією антропогенних навантажень істотно слабкіші від можливих природних змін і не призводять до незворотних наслідків, то такі екологічні порушення слід визнати допустимими⁵. Звідси випливає наступний універсальний критерій – правомірність зниження продуктивності екосистеми на 20–25%. Також можна вважати перспективною гіпотезу про універсальність реакцій організмів на будь-які несприятливі зміни середовища.

У загальному випадку під допустимим екологічним навантаженням в роботі⁶ вважають таке значення, що не викликає небажаних змін екосистем та організмів, зокрема людини, і не призводить до будь-істотного погіршення якості довкілля. Водночас під показником високої якості природного середовища слід розуміти таке його значення, за якого можливим є: стає існування і розвиток історично сформованої і перетвореної людиною екосистеми в даному місці; відсутність в сьогоденні і майбутньому несприятливих наслідків у будь-якій або найбільш важливій популяції зокрема, людини (причому кожної), яка знаходиться в цьому місці історично або тимчасово⁷.

² Ibrahim H. G. A. Descriptive ecology approaches to an urban landscape in Qatar. *Journal of Ecosystem & Ecography*. 2019. Vol. 2. Is. 5. 1000119. DOI: <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000119>

³ Betts M., Wolf C., Ripple W. J., Phalan B. et al. Global forest loss disproportionately erodes biodiversity in intact landscapes. *Nature*. 2017. Vol. 547. P. 441–444. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature23285>

⁴ Cairns J., Niederlehner B. R. Ecosystem health concepts as a management tool. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*. 1995. Vol. 4. P. 91–95. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00044792>

⁵ Rapport D. J. Ecosystem services and management options as blanket indicators of ecosystem health. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*. 1995. Vol. 4. P. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00044793>

⁶ Hui G., Zhang G., Zhao Z., Yang A. Methods of forest structure research: a review. *Current Forestry Reports*. 2019. Vol. 5. P. 142–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00090-7>

⁷ Noh J. K., Echeverria C., Gaona G., Kleemann J. et al. Forest ecosystem fragmentation in Ecuador: challenges for sustainable land use in the tropical Andean. *Land*. 2022. Vol. 11(2). 287. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020287>

Автор⁸ зазначає, що допустимість навантаження визначається цілями природокористування. З цього погляду всі екосистеми можна поділити на три категорії: унікальні або заповідні; широко поширені або природні; сильно перетворені або штучні. В екосистемах першої категорії навантаження повинно виключати випадання будь-якого виду; для другої – припустимі деякі зміни, так щоб зберігалася вимоги до середовища; в штучних екосистемах можливі будь-які обґрунтовані зміни у відповідності з визначеними цілями.

Детально розглянуті та узагальнені проблеми екологічного нормування у роботі⁹, згідно з якою норми слід створювати для виконання трьох основних цілей:

- збереження і забезпечення середовища, сприятливого для всього живого;

- ресурсозбереження та ресурсовідновлення з акцентом на біологічні ресурси;

- збереження генофонду і умов його існування.

Важливим є твердження автора, що норми повинні мати територіально диференційований характер, тобто відрізнятися для різних типів ландшафтів, і бути варіантними, тобто відрізнятися для різних ситуацій природокористування.

Установлення меж змін факторів екологічно стійкого середовища запропоновано на початку 1980-х років канадськими дослідниками, зокрема в угіді з контролю транскордонних забруднень з США. Надалі ця концепція була розвинена в Скандинавії, де запропоновано термін «критичного навантаження»¹⁰. Були зроблені спроби розширення концепції критичних навантажень не тільки для кислотних випадань, але і для важких металів¹¹.

Автор праці¹² вважає необхідним розглядати екологічне нормування в рамках загальної проблеми стійкості екосистем. При цьому

⁸ Hui G., Zhang G., Zhao Z., Yang A. Methods of forest structure research: a review. *Current Forestry Reports*. 2019. Vol. 5. P. 142–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00090-7>

⁹ Angelaki A., Dionysidis A., Sihag P., Golia E. E. Assessment of contamination management caused by copper and zinc cations leaching and their impact on the hydraulic properties of a sandy and a loamy clay soil. *Land*. 2022. Vol. 11(2). 290. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020290>

¹⁰ Peltola T., Tuomisaari J. Re-inventing forestry expertise: strategies for coping with biodiversity protection in Finland. *Forest Policy and Economics*. 2016. Vol. 62. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.10.005>

¹¹ Langlet D., Mahmoudi S. EU environmental law and policy, 1st ed. Oxford: Oxford University Press, 2016. 386 p. DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198753926.001.0001>

¹² Wang F., Huang C., Chen Z., Bao K. Distribution, ecological risk assessment, and bioavailability of cadmium in soil from Nansha, Pearl river Delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16(19), 3637. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16193637>

допустимим впливом повинно бути таке, яке не призводить до втрати стійкості.

Поданий аналіз вказує на доцільність застосування показника стійкості щодо оцінки стану будь-якої екосистеми. Теоретичні основи стійкості обґрунтовані в класичних працях Пуанкаре, Ляпунова, Лагранже та інших, які ґрунтуються на оцінках засвоєння і трансформації енергії та інформації, тобто законах термодинаміки функціонування екосистем, синергетики, показниках ентропії у відкритих системах. Авторами доказано, що внаслідок зовнішніх негативних впливів природний розвиток екосистем характеризується послідовною зміною їх станів. Здатність долати наслідки таких зовнішніх негативних впливів будемо називати стійкістю ПЧГ.

Метою цього дослідження є:

- визначення сучасного стану знань та основних напрямів досліджень у світі щодо взаємозв'язку стійкості та циркулярної економіки на основі здійснення бібліометричного аналізу публікацій;
- спроба гармонізувати підходи, що використовують як у національній, так й у світовій практиці щодо поняття стійкості, для оцінки екологічних та захисних вимог в ПЧГ;
- ввести чітке розуміння поняття стійкості, як здатності ПЧГ тривалий час витримувати, адаптуватись чи протидіяти шкідливим зовнішнім впливам без серйозних порушень її структурно-функціональних характеристик і деградації утворюючих компонентів.
- розвинути методологічні аспекти встановлення екологічних та захисних вимог до ПЧГ, що базуються на визначенні складових елементів показника стійкості, які оцінюють за певною шкалою, із застосуванням відповідних критеріїв, розроблених та поданих для кожної градації шкали.

Найбільш ефективною для вирішень завдань дослідження визнано теорію біотичної регуляції, сутність якої ґрунтується на законах організації і функціонування довкілля, обмеження господарського втручання, і яка спрямована на підтримку екологічної рівноваги¹³. За припущення, що до системи в її стійкому стані потрапляє певна кількість рівномірно розподілених забруднювачів, стійкість запропоновано розглядати на прикладі двокамерної моделі.

Для аналізу сукупності властивостей, які найбільш повно характеризують систему з огляду на мету дослідження, використано

¹³ Forsberg M. Landskapsplanering för naturvård och virkesproduktion – Särskilt med koppling till ersättningsrätten. *Nordic Environmental Law Journal*. 2018. Is. 1. P. 89–92. Available at: <https://www.nordiskmiljoratt.se/onebmedia/Forsberg.pdf>

міжнародні стандарти¹⁴ з метою адекватного моделювання стійкості та чіткого ранжування ризиків, які впливають на процеси в ПЧГ.

1. Взаємозв'язок стійкості та циркулярної економіки: бібліометричний аналіз

Для визначення сучасного стану знань та основних напрямів досліджень у світі щодо взаємозв'язку стійкості та циркулярної економіки нами здійснено бібліометричний аналіз публікацій згідно з базою Scopus. На основі пошуку в цій базі в назві, анотаціях та ключових словах за критерієм «circular economy» і «stability» станом на 10.01.2024 р. нами знайдено 739 документів, що опубліковані протягом 2008–2023 рр. (рис. 1).

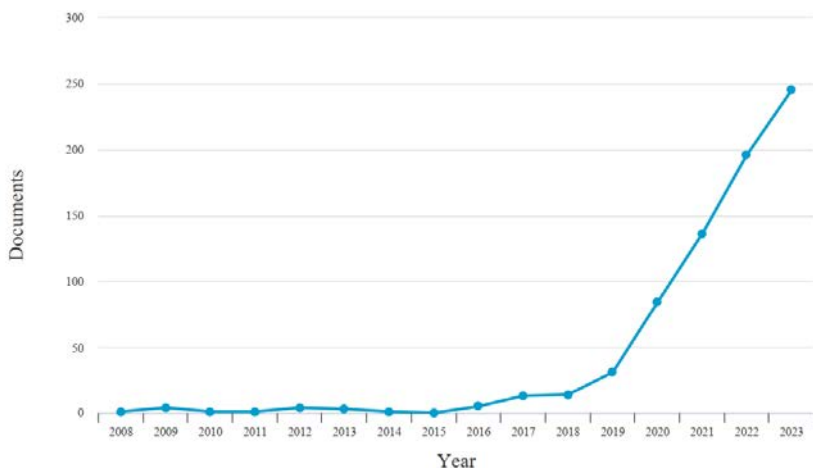


Рис. 1. Динаміка щорічної продуктивності світової науки щодо досліджень із циркулярної економіки та стійкості згідно з базою Scopus

З'ясовано, що протягом останніх п'яти років відбулося істотне зростання щорічної продуктивності світової науки щодо досліджень із циркулярної економіки та стійкості згідно з базою Scopus, при цьому протягом 2019–2023 рр. опубліковано 93,6 % (692 роботи) від загальної

¹⁴ Tang Y., Jing J. J., Zhang Z. D., Yang Y. A. Quantitative risk analysis method for the high hazard mechanical system in petroleum and petrochemical industry. *Energies*. 2018. Vol. 11(1). P. 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11010014>; EC/ISO 31010:2019. Risk management – risk assessment techniques focuses on risk assessment. Available at: <https://www.iso.org/standard/72140.html>

кількості праць. Це може свідчити про відносну новизну досліджуваної проблематики. Загалом протягом 2008–2023 рр. зафіксовано збільшення щорічної продуктивності світової науки щодо досліджень із циркулярної економіки та стійкості згідно з базою Scopus у 245 разів. Найбільше робіт опублікували китайські, італійські, іспанські, індійські та португальські вчені (рис. 2).

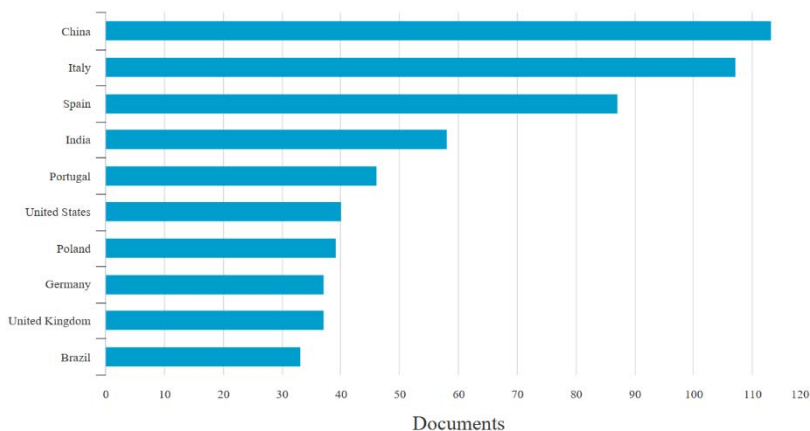
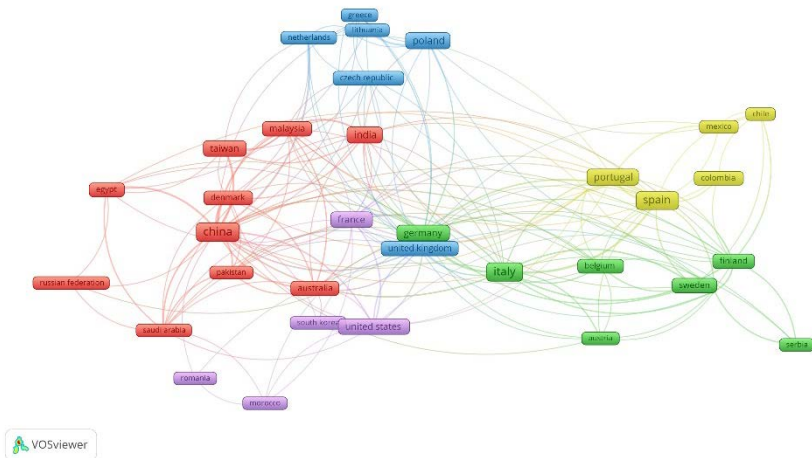


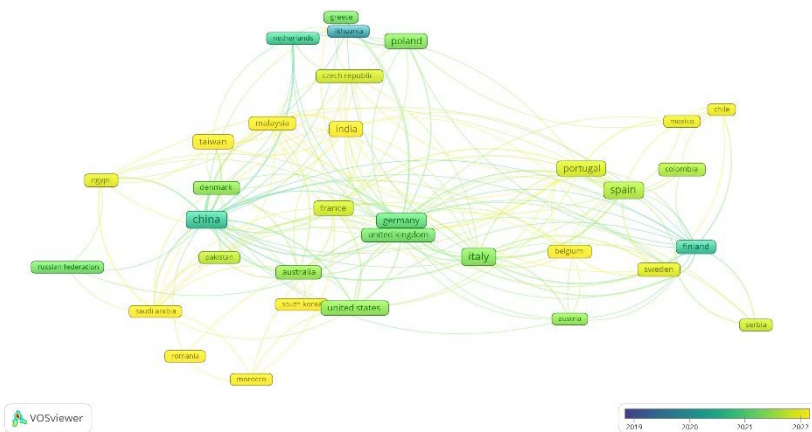
Рис. 2. Десять країн, що є світовими лідерами за кількістю досліджень із циркулярної економіки та стійкості згідно з базою Scopus

Так, учені з Китаю опублікували 113 робіт (15,3 % від загальної кількості у світі), з Італії – 107 робіт (14,5 %), з Іспанії – 87 робіт (11,8 %), з Індії – 58 робіт (7,8 %), з Португалії – 46 робіт (6,2 %). Організаціями, які найбільше профінансували досліджень із циркулярної економіки та стійкості згідно з базою Scopus, є National Natural Science Foundation of China (41 робота, 5,5 %), European Regional Development Fund (37 робіт, 5,0 %), European Commission (34 роботи, 4,6 %). Для виявлення та картування міжнародної наукової кооперації нами побудовано просторову (а) та часову (б) бібліометричні карти наукової співпраці вчених із різних країн світу у сфері досліджень із циркулярної економіки та стійкості за галузями згідно з базою Scopus (рис. 3).

Установлено, що вчені світу, досліджуючи питання циркулярної економіки та стійкості, тісно співпрацюють між собою, при цьому виокремлено п'ять кластерів такої співпраці (рис. 3а):



a)



б)

Рис. 3. Просторова (а) і часова (б) бібліометричні карти наукової співпраці вчених із різних країн світу у сфері досліджень із циркулярної економіки та стійкості згідно з базою Scopus

1) червоний кластер включає 10 країн: Китай, Індія, Австралія, Малайзія, Тайвань, Данія, Єгипет, Пакистан, російська федерація, Саудівська Аравія;

2) зелений кластер включає 7 країн: Італія, Німеччина, Бельгія, Швеція, Фінляндія, Австрія, Сербія;

3) блакитний кластер включає 6 країн: Польща, Велика Британія, Чеська Республіка, Нідерланди, Литва, Греція;

4) жовтий кластер включає 5 країн: Іспанія, Португалія, Колумбія, Мексика, Чилі;

5) фіолетовий кластер включає 5 країн: США, Франція, Південна Корея, Румунія, Марокко.

Хронологічна візуалізація (рис. 3б) вказує на те, раніше (до 2020 р.) започатковано дослідження із циркулярної економіки та стійкості та міжнародну співпрацю в таких країнах, як Китай, Фінляндія, Литва та Німеччина, у той час, як в останні роки (2022–2023 рр.) ці дослідження та співпрацю розпочали розвивати такі країни: Індія, Бельгія, Південна Корея, Малайзія, Тайвань, Румунія, Саудівська Аравія, Румунія та Марокко. В інших країнах зазначені дослідження та міжнародна співпраця започатковані переважно у 2020–2021 рр.

У структурі досліджень із циркулярної економіки та стійкості за галузями згідно з базою Scopus (рис. 4) провідну роль займають науки про довкілля (16,0 %), інженерія (12,4 %), науки про матеріали (12,4 %), хімія (9,7 %), енергетика (9,4 %), хімічна інженерія (9,0 %), сільськогосподарські та біологічні науки (4,7 %). Основними журналами, в яких опубліковано результати досліджень із циркулярної економіки та стійкості є такі: *Polymers* (27 робіт, 3,7 %), *Journal of Cleaner Production* (20 робіт, 2,7 %), *Sustainability* (19 робіт, 2,6 %), *Applied Sciences* (12 робіт, 1,6 %), *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* (11 робіт, 1,5 %), *Materials* (11 робіт, 1,5 %), *Science of the Total Environment* (11 робіт, 1,5 %), *Energies* (10 робіт, 1,4 %). Решта журналів опублікували по менше, ніж 10 робіт.

За типом робіт провідну роль займають статті – 539 документів, що становить 72,9 % від загальної кількості робіт із циркулярної економіки та стійкості за галузями згідно з базою Scopus. Метадані статей використано нами для бібліометричного аналізу (рис. 3, 5).

Візуалізація закономірностей тематичного розподілу в просторі у сфері досліджень із циркулярної економіки та стійкості за галузями згідно з базою Scopus із використанням інструменту VOSviewer дозволила нам виділити п'ять кластерів, що включають 389 термінів (рис. 5а):

1) червоний кластер включає 90 слів (23,1 % від загальної кількості), основні терміни: *fourier transform infrared spe* (204), *environmental impact* (148), *cost effectiveness* (122);

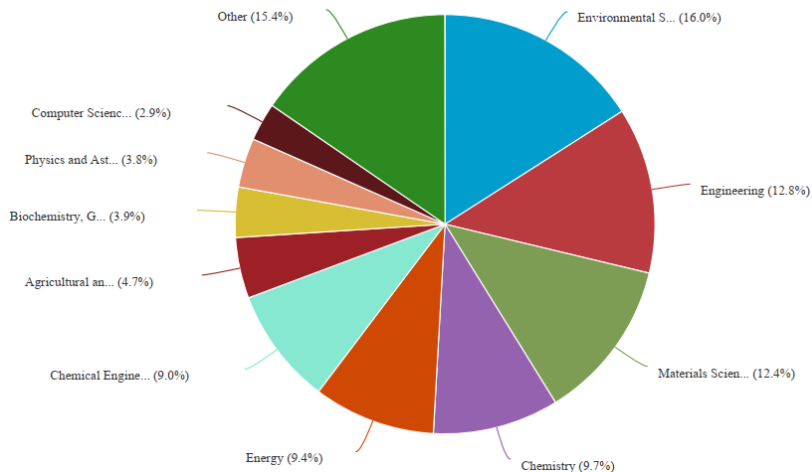


Рис. 4. Структура документів щодо досліджень із циркулярної економіки та стійкості за галузями згідно з базою Scopus

2) зелений кластер включає 68 слів (17,4 % від загальної кількості), основні терміни: nonhuman (199); sustainability (182); biomass (177);

3) синій кластер включає 66 слів (17,0 % від загальної кількості), основні терміни: circular economy (378); carbon dioxide (163); catalysis (136);

4) жовтий кластер включає 48 слів (12,3 % від загальної кількості), основні терміни: chemical stability (175); biofuel (126); polyurethanes (98);

5) фіолетовий кластер включає 44 слова (11,3 % від загальної кількості), основні терміни: controlled study (211), adsorption (162); thermostability (159);

6) блакитний кластер включає 31 слово (8,0 % від загальної кількості), основні терміни: chemistry (162), extraction (133); physical chemistry (123);

7) помаранчевий кластер включає 22 слова (5,7 % від загальної кількості), основні терміни: oxygen (145), biodegradability (129); polymer (128);

8) коричневий кластер включає 20 слів (5,1 % від загальної кількості), основні терміни: recycling (279); sustainable development (257); waste management (257).

Хронологічна візуалізація (рис. 5б) вказує на те, відносно раніше (до 2021 р.) у дослідженнях із циркулярної економіки та стійкості переважно використовували такі терміни, як електронні відходи, добрива, вилучення забруднювачів, бактерії, біогаз, у той час, як в останні роки (2022–2023 рр.) ці дослідження концентруються навколо таких термінів: хімія, термогравіметричний аналіз, інфрачервоне випромінювання Фур'є, біорозкладні полімери, етилен.

Таким чином, нами визначено сучасний стан знань та основні напрями досліджень у світі щодо взаємозв'язку стійкості та циркулярної економіки на основі здійсненого бібліометричного аналізу публікацій згідно з базою Scopus. Водночас слід зазначити, що на основі пошуку в базі Scopus в назві, анотаціях та ключових словах за критерієм «circular economy» і «ecosystem stability» станом на 10.01.2024 р. нами знайдено лише два документи, що стосуються інноваційної концепції ефективної валоризації прецизійних результатів вирощування водоростей у бік екосистемної стійкості та біоекономіки, що супроводжується досягненнями біотехнологій¹⁵, управління внесенням добрив і мульчуванням, яке сприяло мікробному різноманіттю та змінило розподіл мікробів, що забезпечує потенційний шлях для підходів до сталого управління сільським господарством у виробничій практиці в умовах циркулярної економіки¹⁶. Тепер розглянемо безпосередньо теоретико-методологічні аспекти стійкості для оцінювання захисних властивостей просторово-часової геосистеми.

2. Показник стійкості для оцінювання захисних властивостей просторово-часової геосистеми

Для оцінки стійкості екологічних систем слід проаналізувати принципи, методи та механізми її отримання. Швидкість відновлення екосистем, наприклад, унаслідок антропогенного втручання, залежить від їхнього положення відносно рівноважного стану. З посиленням несприятливих природних чинників відбувається збурення відхилень від рівноважного стану до того ступеня, поки система не втратить стабільність, що може призвести до її руйнування. Згідно з низкою

¹⁵ Meitei M. M., Singh S. K., Mangang Y. A., Meena D. et al. Effective valorization of precision output of algaquaculture towards eco-sustainability and bioeconomy concomitant with biotechnological advances: an innovative concept. *Cleaner Waste Systems*. 2022. Vol. 3. 100026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100026>

¹⁶ Yang Y., Tong Y., Liang L.-Y., Li H.-C. et al. Dynamics of soil bacteria and fungi communities of dry land for 8 years with soil conservation management. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 299. 113544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113544>

ключових положень теорії біотичної регуляції¹⁷, головне завдання полягає не стільки в скороченні антропогенних викидів, скільки в збереженні ієрархічної структури ПЧГ і забезпеченні біотичних механізмів її регулювання, використання та відтворення. Зокрема індикатором різноманітності, стану рівноваги і порушення ПЧГ є рослинність, а регуляторним механізмом її формування, відновлення від початкового до рівноважного стану і стабілізації виступає компартмент. Тому оцінка стійкості ПЧГ повинна базуватися на порівняльній оцінці суцесійних стадій угруповань у компартменті від початкового до стійкого клімаксового стану. Її виконують за такими ознаками:

- відмінністю $\Delta Z = Z_2 - Z_1$ одного стану системи відносно іншого;
- допустимим відхиленням від базового стану або мінливістю $Z_0 - Z_1 < \Delta Z$;

- інтервалом часу Δt , в межах якого відбуваються зміни чи оцінюється стійкість;

- впливом одного або кількох зовнішніх факторів h_i чи їх синергії.

Згідно з цими ознаками М. Д. Гродзинський виділив три форми стійкості – відновлювальність, інерційність і пластичність, які для спрощення тлумачення спочатку можна звести до двох – резистентності та пластичності:

- резистентність – здатність компартменту K під впливом дії

факторів h_i протягом часу Δt не виходити за межі стійкості $\frac{h_i}{\Delta t} \leftarrow Z_1$;

- пластичність – здатність компартменту K після припинення дії факторів h_i протягом часу Δt повертатися до початкового стійкого стану

$\frac{h_i}{\Delta t} \rightarrow Z_2$.

Отже, стійкість можна розглядати, з одного боку, як здатність компартменту протидіяти впливу зовнішніх факторів і зберігати свої характеристики у стані Z_1 (резистентна стійкість за Ляпуновим), а з іншого – бути пластичним, тобто відновлювати свої властивості до Z_2 . Чим більший опір чинить компартмент впливу зовнішніх антропогенних та абіотичних факторів, тим важче порушити стійкість, але, якщо вона порушена, тоді її важко повернути у вихідний стан і навпаки, чим менший чиниться опір, тим легше повернутись у початковий стан.

Форми стійкості тлумачить рис. 6 з двома областями існування системи. Пластичні компартменти швидко втрачають стійкість навіть при слабкій дії

¹⁷ De Jong J., Dahlberg A. Impact on species of conservation interest of forest harvesting for bioenergy purposes. *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 383. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.016>

h_1 фактора, що призводить до зміни їхнього стану R_1D_1 ; згодом відбувається їх відновлення D_1R_2 . При сильній дії $h_2 > h_1$ фактора система хоча і зазнає більших змін R_2D_2 , але не виходить за межі області відновлення (рис. 6а). Натомість резистентна система за слабкої дії h_1 зовнішнього фактора незначно втрачає стійкість R_1D_1 швидко повертаючись в D_1R_2 ; за сильнішої дії h_2 вона поступово заходить у запорогову область невідновлюваного стану R_2C і втрачає стійкість (рис. 6б).

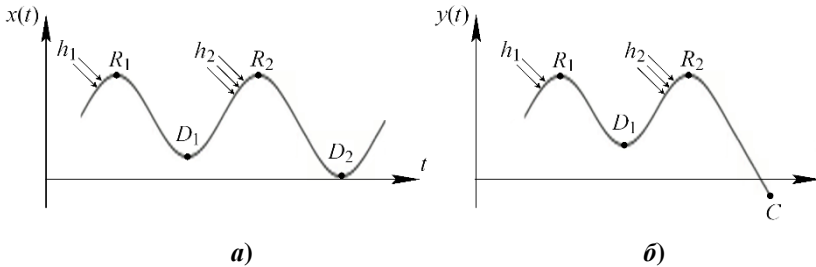


Рис. 6. Схема змін компартменту СЛК пластичного (а) та резистентного (б) типу, де стани, відповідно, R – відновлення, D – порушення; C – катастрофи; h – впливи

Висока пластичність і низька резистентність означає здатність уникати стану катастрофи C або знижувати ризик руйнування компартменту P_C , а низька пластичність і висока резистентність – його підвищувати. Тому для оцінки ризику головною ознакою є ступінь резистентності, а не пластичності.

Отже, на основі аналізу різноманітності компартментів, що входять до ПЧГ, їх можна розділити на три категорії:

- P – пластичні (гідрофільні, сегетальні, рудеральні, вторинні), що знаходяться у стані постійної динаміки, легко відновлюються, оскільки компартмент не змінюється, мають низьке флористичне багатство, слугують осередками розселення адвентивних видів, мають дуже низький ступінь ризику втрати компартменту;

- I – інерційні (лісові, степові), що при руйнуванні здатні до відновлення через тривалий час, проходять стадії сингенезу, ендео-генезу, філценогенезу (переважають процеси трансгенезу), що супроводжується поступовим відновленням компартменту в структурі СЛК;

- R – резистентні або стійкі, що знаходяться в екстремальних умовах (наскельні, піщано-літоральні, верхові болота на межі ареалу, під постійним антропогенним тиском), добре зберігають свою структуру, але при її порушенні руйнуються компартмент, що не відновлюється.

Для компартментів останнього типу характерний високий ендемізм, тобто в їхньому історичному розвитку флорогенез переважає над процесами трансгенезу, а тому вони стійкі до проникнення адвентивних видів. Екологічні амплітуди компартментів такого типу досить вузькі, а, відповідно, ступені ризику їх втрати найвищі.

Оскільки стійкість не має абсолютного значення, то не коректно говорити, що компартмент стійкий чи не стійкий, але можна оцінити, що в ПСГ один компартмент K_1 стійкіший, ніж інший K_2 відносно дії певного фактора h_i чи їх синергійної дії F , або стан ПЧГ Z_2 стійкіший, ніж стан Z_1 у певних умовах. Тому загалом стійкість ПЧГ залежить від двох змінних: ступеня дії певного фактора h та специфікою чи розташуванням компартменту K . Тобто результатом може бути вектор, який характеризує напрям і значенням різниці між показниками компартментів. Для цього потрібно обрати компартмент, як еталон K_0 або змоделювати гаку ПЧГ, яка за певних умов має найстійкіший стан Z_0 . Водночас у такому стані ПЧГ існувати не можуть, оскільки з урахуванням законів термодинаміки ПЧГ є відкритою неврівноваженою системою і тоді мають найвищий ризик руйнування¹⁸. Отже, чим ближче перебуває K до стійкого, рівноважного, клімаксового стану Z_0 , тим вищий ризик його руйнування $K \rightarrow Z_0 \Rightarrow P_C \rightarrow \max$, а якщо K перебуває на початкових стадіях розвитку, далеко від рівноважного стану Z_0 , то ризик його руйнування низький $K \leftarrow Z_0 \Rightarrow P_C \rightarrow \min$. Цей висновок відображає сутність методу оцінки стійкості та ризиків руйнування компартментів ПЧГ.

В оцінці ризику чільне місце належить дослідженню сукцесійного розвитку компартменту. Сукцесія розглядається як можливість перебудови структури компартменту відносно зміни довкілля. Хоча це самоорганізований та самопідтримуючий процес, однак він спрямований у бік удосконалення механізмів акумуляції енергії через адаптаційні властивості видів, зниження енергетичних витрат, а відтак зниження показників ентропії, що означає наближення до стійкого, але водночас і термінального стану, тому зростає ризик руйнування компартменту. За Р. Уїттекером, сукцесія – це не лінійний і строго детермінований, а стохастичний процес. А це означає, що кожен ярус підсистеми (ценопопуляція) може бути заміщений іншим, краще адаптованим до існуючих умов або наступних можливих змін, і таке заміщення відбувається на всіх етапах процесу, у кожній з підсистем компартменту. Отже, показник біотичного різноманіття тих елементів, які в ході сукцесії можуть взаємозаміщуватися, має вирішальне

¹⁸ De Jong J., Dahlberg A. Impact on species of conservation interest of forest harvesting for bioenergy purposes. *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 383. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.016>

значення, оскільки зниження біорізноманіття звужує область стійкості. Хоча компартмент може бути досить стійким і при обмеженій кількості видів (наприклад, букові ліси), але при цьому можливі варіанти заміщення і ймовірність формування стійких станів звужується. Отже, головне завдання полягає в тому, щоб оцінити положення певного компартменту у сукцесійному ряді.

Для оцінки ризику руйнування компартменту запропоновано використати показники, які даватимуть змогу оцінити дві групи ознак: кількісні показники його зміни або швидкість сукцесій V і масштабність змін S , тобто його часовий та просторовий стан – $f(V, S)$. Причому можуть бути використані як безпосередні, так і опосередковані характеристики. Зокрема, наприклад, наявність у складі ярусів чи підсистем компартменту видів, занесених до охоронних списків, спричиняє більший ризик руйнування. Такі види, зазвичай, пов'язані з рідкісними компартментами або знаходяться у зоні більшого ризику руйнування через надмірну експлуатацію. Для оцінки важливі і такі характеристики, як показники гемеробії, що відображають здатність видів рослин зростати і поширюватися у різного ступеня перетворених людиною екосистемах. Іншою ознакою є типи стратегій поведінки видів, що відображають їхнє відношення до заселення та утримання компартменту: R – стрес-толеранти заселяють екстремальні екотопи; S – патенти утримуються за рахунок конкуренції, протидії впливу зовнішніх факторів, тобто характеризують інерційність ценозу; K – експлеренти, що швидко реагують і характеризують ступінь резистентності ценозу.

На основі виконаного аналізу вибрано 12 основних показників, які даватимуть змогу різносторонньо оцінювати ступінь стійкості та масштаби трансформації компартменту у просторово-часовому вимірі, а саме:

- вплив антропогенної трансформації;
- відновлювальність;
- положення у сукцесійному ряду (відносно антропогенних сукцесій);
- регіональна репрезентативність;
- характер поширення;
- екологічна амплітуда;
- екологічні умови поширення;
- наявність інвазійних видів;
- ступінь гемеробності (ha , %);
- співвідношення між типами стратегій ($s/r/k$);
- нозологічна значущість;
- синфітосозологічний статус.

Вагу кожного показника запропоновано оцінювати в балах від 1 до 4. Мінімальна кількість балів, яку може отримати компартмент за всіма показниками – 12 балів, максимальна – 48 балів; різниця між ними становить 36 балів. Тоді ступінь ризику P_C , як втрати кожного бала: $1 \text{ бал} \equiv 100 \% : 36 = 2,78 \%$. Причому кількість урахованих показників можна змінювати.

Отримувані під час оцінювання показників бали запропоновано впорядкувати за шкалою оцінювання стійкості й ризику втрати компартменту, розділивши їх на п'ять класів, що мають діапазон по 7 балів:

– I клас (42–48 балів) – дуже рідкісні, що мають «вузьке» поширення, погане відтворення, дуже високий ($P_C > 83 \%$) показник ризику руйнування, дуже чутливі до зміни екологічних факторів і потребують особливих комплексних заходів охорони;

– II клас (35–47 балів) – рідкісні, що мають обмежене поширення, слабе відтворення, високий ($P_C = 63\text{--}83 \%$) показник ризику руйнування, чутливі до впливу антропогенного фактора і потребують певних цільових заходів щодо їх охорони;

– III клас (28–34 бали) – мають фрагментарне поширення і під впливом дії антропогенних факторів тенденцію до скорочення, характеризуються повільним відновленням, мають середній ($P_C = 43\text{--}63 \%$) показник ризику руйнування і потребують часткової охорони;

– IV клас (21–27 бал) – мають звичайне поширення, типові угруповання, нормально відновлюються в цих умовах, мають низький ($P_C = 23\text{--}43 \%$) показник ризику руйнування, стійкі до антропогенного впливу, хоча і не потребують заходів з охорони, але можуть бути знищені при надмірній антропогенній діяльності;

– V клас (12–19 балів) – досить розповсюджені компартменти, достатньо адаптовані до дії антропогенних факторів або формуються під їхньою дією, мають дуже низький ($P_C < 23 \%$) показник ризику руйнування і не потребують охорони.

ВИСНОВКИ

Визначено сучасний стан знань та основні напрями досліджень у світі щодо взаємозв'язку стійкості та циркулярної економіки на основі здійсненого бібліометричного аналізу публікацій згідно з базою Scopus. Протягом останніх п'яти років зафіксовано істотне зростання щорічної продуктивності світової науки щодо досліджень із циркулярної економіки та стійкості згідно з базою Scopus, при цьому протягом 2019–2023 рр. опубліковано 93,6 % (692 роботи) від загальної кількості праць, що свідчить про відносну новизну досліджуваної проблематики.

Авторами показано, що природний розвиток ПЧГ хоч і спрямований унаслідок дисипативних процесів до рівноважного стану, але система не може тривало існувати в такому стані й потребує додаткової енергії для свого розвитку. Загалом це відбувається як флуктуаційні зміни. Отже, внаслідок зовнішніх антропогенних впливів ПЧГ характеризує послідовність фаз рівноваги і, власне, кризи. Здатність долати наслідок таких зовнішніх негативних впливів слід називати стійкістю ПЧГ.

Твердження, що окремий компартмент є стійким чи не стійким, не має сенсу, але можна оцінити, що в системі один компартмент стійкіший, ніж інший, а для оцінки стійкості потрібно обрати компартмент, що відіграватиме роль еталона.

Використання типових ознак, доповнених ступенем гемеробності та співвідношення між типами стратегій, дасть змогу визначити соціологічну значущість компартменту, а також із різних боків оцінити ступінь стійкості та масштаби трансформації компартменту в просторово-часовому вимірі. Оцінка розподілу компартментів за класами стійкості характеризує градієнт зміни стійкості й можливу швидкість V її втрати, а врахування площі S , яку займає той чи інший компартмент у ПЧГ, і дає змогу оцінити масштабність цих процесів. Наростання показників ризику свідчить про можливість настання стану катастрофи C . Отже, чим вища швидкість втрати стійкості V , чи наростання ризику PC за короткий час Δt , і чим менша його площа S , тим ближче знаходиться компартмент до катастрофічного стану $V \rightarrow \max \cup S \rightarrow \min \Rightarrow PC \rightarrow \max \Rightarrow (Z1 - Z0)/\Delta t \rightarrow C$. Інакше кажучи, чим більша швидкість суцесії, тим більша ймовірність досягнення компартментом ПЧГ критичного стану й можливості катастрофічних змін.

Запропонований підхід до оцінки стійкості та, як наслідок, ризиків втрати компартменту в просторово-часовій системі дає змогу отримати кількісні показники, що можуть бути використані як індикатори стану всього ПЧС. На їх основі можливим є: розрахунок тих порогових значень величин, поза якими відбуваються негативні явища, прогнозування та моделювання ситуацій, картування джерел ризиків, моніторинг і виявлення причин змін або факторів, що сповільнюють чи стримують наближення ПЧГ до критичного стану, розроблення превентивних заходів запобігання чи зниження шкідливого впливу тощо.

Представлені результати можуть мати значення для потреб нормування функціонування екологічних систем, зокрема, у вигляді стандарту «Екологічні та захисні вимоги до ПЧГ». З огляду на міжнародну стандартизацію показник стійкості може бути використаний, наприклад, для оцінки транскордонного впливу шкідливих об'єктів на екосистему, згідно з міждержавною угодою, яка

приймає до уваги положення Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті, ЕБПО (Фінляндія), 1991.

Подяка. Публікація містить окремі результати досліджень, проведених у рамках НДР «Стратегія й інноваційні технології переробки органічних відходів тваринництва в контексті забезпечення нейтральної деградації земель: від лінійної до циркулярної економіки», № д. р. 0122U001484.

АНОТАЦІЯ

Дослідження спрямоване на узагальнення компартментальної концепції забезпечення якості функціонування просторово-часової геосистеми, уніфікацію екологічних і захисних вимог до її компартментів та конкретизацію критеріїв оцінки довкілля. Визначено сучасний стан знань та основні напрями досліджень у світі щодо взаємозв'язку стійкості та циркулярної економіки на основі здійсненого бібліометричного аналізу публікацій згідно з базою Scopus. Представлено методологічні аспекти оцінки шкідливого антропогенного впливу на навколишнє природне середовище, спрямовані на нормування і визначення показника стійкості екосистеми. Обґрунтовано доцільність застосування такого показника. Показано, що з допомогою оцінки показника стійкості є змога визначати екологічні зміни, які можуть виникати в результаті антропогенної діяльності, а також визначати значимість цих змін. Для адекватного моделювання стійкості запропоновано ранжувати форми стійкості як відгук компартмента на різну інтенсивність дії впливних факторів в просторово-часовій геосистемі. З огляду на відгук компартмент системи може варіювати між станами відновлення, порушення та катастрофи. Систематизовано різноманітність компартментів, що входять до складу просторово-часової геосистеми, та їх відгук на розмаїття наслідків антропогенного впливу. Показано, що стійкість не може приймати абсолютне значення. Тому, окремий компартмент в системі лише може бути стійкіший, ніж інший, щодо дії окремого фактора чи синергійної дії кількох факторів в певних умовах. З метою оцінки стійкості та масштабів трансформації компартменту у просторово-часовому вимірі запропоновано використати типові ознаки, доповнені ступенем гемеробності та співвідношенням між типами стратегій поведінки видів. Введено поняття ризику руйнування компартменту, наростання значення якого свідчить про можливість наступлення катастрофи. Представлено напівкількісну експертну методику та шкалу оцінювання стійкості до шкідливого антропогенного впливу в компартменті, а також оцінку

залишкового впливу, як ризику втрати компартменту. Належність до кожного з п'яти класів стійкості компартментів з врахуванням їх масштабів, тривалості та інтенсивності впливу запропоновано визначати на основі комплексної оцінки, що враховує експертно визначену вагу кожного окремого показника.

Література

1. Gostanza R. Ecological economic issue and consideration in indicator development, selection, and use: toward an operational definition of system health. *Ecological Indicators: Proceeding of an International Symposium*. Florida, 1992. P. 1491–1502.

2. Ibrahim H. G. A. Descriptive ecology approaches to an urban landscape in Qatar. *Journal of Ecosystem & Ecography*. 2019. Vol. 2. Is. 5. 1000119. DOI: <https://doi.org/10.4172/2157-7625.1000119>

3. Betts M., Wolf C., Ripple W. J., Phalan B. et al. Global forest loss disproportionately erodes biodiversity in intact landscapes. *Nature*. 2017. Vol. 547. P. 441–444. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature23285>

4. Cairns J., Niederlehner B. R. Ecosystem health concepts as a management tool. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*. 1995. Vol. 4. P. 91–95. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00044792>

5. Rapport D. J. Ecosystem services and management options as blanket indicators of ecosystem health. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*. 1995. Vol. 4. P. 97–105. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00044793>

6. Hui G., Zhang G., Zhao Z., Yang A. Methods of forest structure research: a review. *Current Forestry Reports*. 2019. Vol. 5. P. 142–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00090-7>

7. Noh J. K., Echeverria C., Gaona G., Kleemann J. et al. Forest ecosystem fragmentation in Ecuador: challenges for sustainable land use in the tropical Andean. *Land*. 2022. Vol. 11(2). 287. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020287>

8. Angelaki A., Dionysidis A., Sihag P., Golia E. E. Assessment of contamination management caused by copper and zinc cations leaching and their impact on the hydraulic properties of a sandy and a loamy clay soil. *Land*. 2022. Vol. 11(2). P. 290. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11020290>

9. Peltola T., Tuomisaari J. Re-inventing forestry expertise: strategies for coping with biodiversity protection in Finland. *Forest Policy and Economics*. 2016. Vol. 62. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2015.10.005>

10. Langlet D., Mahmoudi S. EU environmental law and policy, 1st ed. Oxford: Oxford University Press, 2016. 386 p. DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198753926.001.0001>

11. Wang F., Huang C., Chen Z., Bao K. Distribution, ecological risk assessment, and bioavailability of cadmium in soil from Nansha, Pearl river Delta, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16(19), 3637. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16193637>

12. Forsberg M. Landskapsplanering för naturvård och virkesproduktion – Särskilt med koppling till ersättningsrätten. *Nordic Environmental Law Journal*. 2018. Is. 1. P. 89–92. URL: <https://www.nordiskmiljoratt.se/onebmedia/Forsberg.pdf>

13. Tang Y., Jing J. J., Zhang Z. D., Yang Y. A. Quantitative risk analysis method for the high hazard mechanical system in petroleum and petrochemical industry. *Energies*. 2018. Vol. 11(1). P. 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11010014>

14. EC/ISO 31010:2019. Risk management – risk assessment techniques focuses on risk assessment. URL: <https://www.iso.org/standard/72140.html>

15. Meitei M. M., Singh S. K., Mangang Y. A., Meena D. et al. Effective valorization of precision output of algaquaculture towards eco-sustainability and bioeconomy concomitant with biotechnological advances: an innovative concept. *Cleaner Waste Systems*. 2022. Vol. 3. 100026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100026>

16. Yang Y., Tong Y., Liang L.-Y., Li H.-C. et al. Dynamics of soil bacteria and fungi communities of dry land for 8 years with soil conservation management. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 299. 113544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113544>

17. De Jong J., Dahlberg A. Impact on species of conservation interest of forest harvesting for bioenergy purposes. *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 383. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.016>

18. Li J., Cai C., Zhang F. Assessment of ecological efficiency and environmental sustainability of the Minjiang-source in China. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(11). 4783. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12114783>

Information about the authors:

Taras Boyko

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Precision Mechanics,
Lviv Polytechnic National University
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0487-3293>
12 Stepan Bandera Str., Lviv, 79000, Ukraine

Mariia Ruda

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Ecological Safety
and Nature Protection Activity,
Lviv Polytechnic National University
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0590-4589>
12 Stepan Bandera Str., Lviv, 79000, Ukraine

Lesia Kucher

Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department
of Entrepreneurship and Environmental Examination of Goods,
Lviv Polytechnic National University
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7112-8763>
12 Stepan Bandera Str., Lviv, 79000, Ukraine