

МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ІНДЕКСУ Е-КОМПОНЕНТИ НА ОСНОВІ БАГАТОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ ПОКАЗНИКІВ

ОХОТА Юлія¹, ЧІКОВ Ілля²

¹ Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0001-9943-2206>

e-mail: yuliaokhota2017@gmail.com

² Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2128-5506>

e-mail: ilya95chikov@gmail.com

У статті розроблено науково обґрунтовану методологію моделювання інтегрального індексу екологічної ефективності (Е-компоненти ESG-системи) для малих та середніх сільськогосподарських підприємств України. Проаналізовано ключові методологічні проблеми побудови інтегральних індексів, пов'язані із суб'єктивністю експертного оцінювання, різноманітністю показників та складністю їх агрегування у єдиний комплексний показник. На основі теорії інформації та методу ентропії Шеннона запропоновано об'єктивний підхід до визначення вагових коефіцієнтів, який базується виключно на структурі даних без залучення експертних суджень. Сформовано систему показників екологічної ефективності, де кожен показник класифіковано за типом впливу та пов'язано з відповідними Цілями сталого розвитку ООН. Особливу увагу приділено математичному апарату методології: нормалізації різноманітних показників, розрахунку ентропійних вагових коефіцієнтів та агрегуванню за методом зваженої лінійної суми. Апробовано методологію на вибірці чотирьох реальних сільськогосподарських підприємств та одного умовного еталонного підприємства, що дозволило продемонструвати високу дискримінаційну здатність моделі. Запропоновано п'ятирівневу класифікаційну шкалу інтерпретації значень інтегрального індексу: критичний, низький, середній, високий та лідерський рівні екологічної ефективності. Результати дослідження можуть бути використані при формуванні ESG-стратегій аграрних підприємств, обґрунтуванні інвестицій у екологічну модернізацію, бенчмаркінгу та моніторингу прогресу у досягненні Цілей сталого розвитку.

Ключові слова: інтегральний індекс; ESG; екологічна ефективність; сільськогосподарські підприємства; ентропія Шеннона; нормалізація показників; біодобрива; відновлювані джерела енергії; управління відходами; органічне землеробство.

<https://doi.org/10.31891/mdes/2025-18-39>

Стаття надійшла до редакції / Received 25.09.2025

Прийнята до друку / Accepted 20.11.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Трансформація глобальної економічної системи у напрямі сталого розвитку зумовлює зміну підходів до оцінки діяльності суб'єктів господарювання. Якщо традиційно оцінка ефективності бізнесу базувалася виключно на фінансових показниках, то у сучасних умовах зростає увага до нефінансових аспектів, що відображаються у ESG-концепції. Вона інтегрує три ключові виміри корпоративної діяльності: екологічний (Environmental), соціальний (Social) та управлінський (Governance), формуючи комплексну систему оцінки відповідальності бізнесу перед суспільством та довкіллям.

Екологічна компонента (Е-компонента) ESG-системи набуває особливого значення у контексті загострення глобальних кліматичних викликів, вичерпання природних ресурсів та посилення екологічного регулювання на національному та міжнародному рівнях. Саме через Е-компоненту оцінюється здатність підприємств мінімізувати негативний вплив на довкілля, раціонально використовувати природні ресурси, скорочувати викиди парникових газів та адаптуватися до нових екологічних стандартів. Інвестори, споживачі та регуляторні органи дедалі більше орієнтуються на екологічну ефективність підприємств при прийнятті рішень про інвестування, закупівлі та регулювання.

Ключовою методологічною проблемою побудови інтегральних індексів екологічної ефективності є визначення вагових коефіцієнтів окремих показників при їх агрегуванні у єдиний комплексний показник. Традиційні підходи, що базуються на експертному оцінюванні, характеризуються високим рівнем суб'єктивності, залежністю від компетентності та можливих упереджень експертів, складністю процедури залучення кваліфікованих фахівців, особливо для малих підприємств з обмеженими ресурсами. Це зумовлює актуальність застосування об'єктивних математичних методів визначення вагових коефіцієнтів, які базуються виключно на структурі даних без залучення суб'єктивних суджень. Одним з таких методів є метод ентропії Шеннона, що ґрунтується на фундаментальних принципах теорії інформації та визначає вагу показника через його інформаційну цінність для диференціації об'єктів оцінювання.

Об'єктом дослідження є процеси формування та оцінювання екологічної компоненти сталого розвитку малих та середніх сільськогосподарських підприємств у контексті ESG-концепції. Предметом дослідження виступають методологічні та математичні засади моделювання інтегрального індексу Е-компоненти на основі багаторівневої системи показників з використанням інформаційно-ентропійного підходу до визначення вагових коефіцієнтів.

Роботу виконано в рамках прикладного дослідження на тему «Розробка програми розвитку малих і середніх аграрних підприємств на засадах ESG-орієнтирів для досягнення їх конкурентоспроможності та Цілей сталого розвитку» (державний реєстраційний номер 0125U000382, термін виконання: 2025-2026 рр.), яке виконується за рахунок коштів державного бюджету.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика оцінювання екологічної ефективності сільськогосподарських підприємств та впровадження ESG-концепції в аграрному секторі привертає значну увагу вітчизняних і зарубіжних науковців. Дослідження у цій сфері охоплюють широке коло питань: від теоретико-методологічних засад побудови інтегральних індексів до практичних аспектів екологізації агровиробництва.

Готовність аграрних підприємств України до впровадження ESG-звітності в контексті післявоєнної відбудови та «зеленої» трансформації проаналізовано у роботі, де також виявлено основні бар'єри та драйвери формалізації екологічних практик у звітній документації (Метелиця). Сутність та актуальність ESG-стратегії розкрито в дослідженні, яке акцентує увагу на оцінці ризиків землекористування як ключової складової екологічної компоненти (Мірзоева). Ключові аспекти та підходи управління ESG-програмами на підприємствах агропромислового комплексу України проаналізовано в публікації, де обґрунтовується стратегічний пріоритет ESG для підвищення конкурентоспроможності та залучення інвестицій (Лагодієнко). Адаптацію українських агропідприємств до міжнародних стандартів сталого розвитку через впровадження ESG-маркетингу висвітлено в роботі (Устік). План дій підприємств щодо впровадження ESG-звітності в Україні відповідно до вимог європейських директив CSRD/ESRS запропоновано в дослідженні (Китайчук, Лівашко). Модель сталого розвитку аграрного бізнесу на основі синергії циркулярної економіки та ESG-принципів концептуалізовано у роботі (Скорик, Гончарук). Теоретико-методологічні засади забезпечення екологічної безпеки аграрного сектору обґрунтовано в дослідженні (Карташов). Прогнозування економічної ефективності сільськогосподарських підприємств стало предметом дослідження (Россох). Вплив цифрових технологій на підвищення ефективності, стійкості та конкурентоспроможності аграрних підприємств показано у роботі (Коляденко).

Незважаючи на значний доробок вітчизняних науковців, залишаються недостатньо дослідженими питання побудови інтегральних індексів екологічної ефективності саме для малих та середніх сільськогосподарських підприємств з використанням об'єктивних методів визначення вагових коефіцієнтів. Більшість існуючих методик базуються на експертному оцінюванні, що характеризується суб'єктивністю та складністю відтворення результатів. Це зумовлює актуальність розробки методології на основі інформаційно-ентропійного підходу, яка забезпечує повну об'єктивність визначення вагових коефіцієнтів виключно на основі структури даних без залучення експертних суджень.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою дослідження є розробка науково обґрунтованої методології побудови інтегрального індексу екологічної ефективності для малих та середніх сільськогосподарських підприємств на основі системи показників, яка забезпечує комплексну, об'єктивну та порівнянну оцінку екологічної ефективності.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розробка системи показників для оцінювання екологічної ефективності малих та середніх сільськогосподарських підприємств вимагає врахування специфіки аграрного виробництва та доступності екологічних даних. На основі аналізу міжнародних стандартів ESG-звітності та практики вітчизняних агропідприємств нами сформовано систему показників:

Таблиця 1

Система показників Е-компоненти ESG-концепції для оцінки екологічної ефективності аграрних МСП

№	Показник	Найменування та визначення	Тип	ЦСР
П ₁	Сільськогосподарські угіддя, га	Загальна площа сільськогосподарських угідь у користуванні підприємства, га. Показник контексту, характеризує масштаб діяльності	-	-
П ₂	Частка сільськогосподарських угідь, на яких не застосовуються хімічні добрива та пестициди, %	Відсоток сільськогосподарських угідь, де не використовуються хімічні добрива й пестициди та впроваджуються органічні методи землеробства. Високе значення свідчить про орієнтацію на сталі землеробські практики та захист ґрунтового біорізноманіття	С	ЦСР 2, ЦСР 15
П ₃	Обсяг внесення мінеральних добрив, кг (л) / га	Обсяг синтетичних мінеральних добрив, внесених у розрахунку на один гектар сільськогосподарських угідь, кг/га. Підвищені значення вказують на інтенсивну хімізацію з ризиками евтрофікації водоем та забруднення ґрунтових вод	Д	ЦСР 6, ЦСР 12, ЦСР 15
П ₄	Обсяг внесення біодобрив, кг (л) / га	Обсяг органічних добрив (компост, гній тварин, біогумус, рідкі органічні препарати) у розрахунку на один гектар, кг/га. Високі значення демонструють впровадження екологічних практик вдосконалення ґрунту та зменшення залежності від синтетики	С	ЦСР 2, ЦСР 12, ЦСР 15
П ₅	Використання засобів захисту рослин, кг (л) / га	Обсяг засобів захисту рослин (пестициди, гербіциди, фунгіциди), внесених у розрахунку на один гектар, кг/га. Зниження цього показника відповідає принципам integrated pest management та мінімізує забруднення й ризики для здоров'я робітників	Д	ЦСР 3, ЦСР 6, ЦСР 12
П ₆	Витрати на придбання енергопродуктів для власних потреб, тис. грн	Сукупні витрати підприємства на всі види енергоносіїв (електроенергія, природний газ, дизельне паливо, бензин, мазут, солідол тощо) у грошовому вираженні на один гектар, грн/га. Нижчі значення свідчать про енергоефективність виробництва та зменшення вуглецевого сліду	Д	ЦСР 7, ЦСР 8, ЦСР 13
П ₇	Прямі матеріальні витрати на паливне і мастильні матеріали (нафтопродукти, газ для автомобілів тощо), тис. грн	Прямі витрати на придбання дизельного палива, бензину й мастильних матеріалів для сільськогосподарської техніки у розрахунку на один гектар, грн/га. Зниження відображає оптимізацію робочих процесів та переходу на енергозбереження	Д	ЦСР 7, ЦСР 13
П ₈	Прямі матеріальні витрати на електроенергію, тис. грн	Прямі витрати на придбання електроенергії для виробничих потреб у розрахунку на один гектар, грн/га. Показує енергоємність виробничих процесів, сушіння, зберігання, механізації та освітлення	Д	ЦСР 7, ЦСР 8
П ₉	Прямі матеріальні витрати на паливо й енергію, тис. грн	Інтегральний показник всіх прямих витрат на паливо й енергію у розрахунку на один гектар угідь, грн/га. Відображає загальну енергетичну інтенсивність господарства та економічну ефективність енергоспоживання	Д	ЦСР 7, ЦСР 8, ЦСР 13
П ₁₀	Якість управління с/г відходами, бал (0-10)	Бальна оцінка (0-10 балів) системності та комплексності підходу до поводження з відходами рослинництва (солома, гичка, гноївка) та тваринництва (гній, послід). Враховує: наявність плану управління, раціональність утилізації, мінімізацію захоронення	С	ЦСР 12
П ₁₁	Установки оброблення відходів станом на кінець року, шт.	Число об'єктів на території господарства, призначених для обробки й переробки відходів: компостні майданчики, біогазові реактори, установки гранулювання соломи, вермикомпостери. Показує матеріально-технічну базу для циркулярної економіки	С	ЦСР 12
П ₁₂	Наявність екологічної сертифікації, шт.	Число чинних на час обстеження міжнародних та національних екологічних сертифікатів та сертифікатів якості: ISO 14001, органічна сертифікація (EU Organic, IFOAM), сертифікація добробуту тварин, кодекси поведінки ESG. Відображає інституціалізацію екологічних вимог	С	ЦСР 12
П ₁₃	Обсяг споживання електроенергії, кВт год	Обсяг спожитої електроенергії у розрахунку на один гектар сільськогосподарських угідь, кВт год/га. Натуральний показник енергоефективності технологічних процесів без впливу цін на енергоносії	Д	ЦСР 7
П ₁₄	Обсяг споживання природного газу, м³	Обсяг спожитого природного газу у розрахунку на один гектар, м³/га. Використовується для опалення господарських приміщень, сушіння зерна, теплотехнологічних процесів. Показує газоефективність енергопостачання	Д	ЦСР 7, ЦСР 13

П ₁₅	Частка відновлюваних джерел енергії в загальному енергобалансі підприємства, %	Відсоток енергопостачання господарства з альтернативних джерел (сонячна, вітрова, біомаса, гідро) в загальному енергобалансі. Високі значення свідчать про енергетичну незалежність, декарбонізацію виробництва та готовність до зміни клімату	С	ЦСР 7, ЦСР 13
П ₁₆	Готовність до диверсифікації через виробництво біопалив, бал (0-10)	Бальна оцінка (0-10 балів) потенціалу та реальних кроків підприємства у розвитку біоенергетичного напрямку: наявність сировинної бази, розглядання проектів біодизелю, біогазу, брикетування. Відображає інноваційну орієнтацію	С	ЦСР 7, ЦСР 8, ЦСР 13

Примітка: С - стимулятор; Д - дестимулятор

Джерело: побудовано авторами на основі [12, 13]

Представлена система показників охоплює ключові напрями екологічної діяльності сільськогосподарських підприємств, що мають суттєве значення для оцінки їх внеску у сталий розвиток [14]. Особливістю цієї системи є врахування галузевої специфіки малих та середніх аграрних підприємств через включення показників, пов'язаних з органічним землеробством, інтенсивністю внесення біодобрив, управлінням сільськогосподарськими відходами та готовністю до розвитку біопаливних проектів, що є особливо релевантними для цього сектору економіки.

Кожен показник має чітке концептуальне визначення, яке пояснює, що саме вимірюється та чому це є важливим для оцінки екологічної ефективності. Крім того, для кожного показника визначено його тип: стимулятор або дестимулятор [15]. Показник-стимулятор характеризується тим, що його зростання свідчить про покращення екологічної ефективності підприємства (наприклад, частка відновлюваних джерел енергії у загальному енергобалансі, інтенсивність внесення органічних добрив, кількість функціонуючих установок переробки відходів, наявність екологічних сертифікатів). Показник-дестимулятор має протилежну логіку: його зменшення є позитивним сигналом для екологічної ефективності (наприклад, інтенсивність використання пестицидів, питоме споживання електроенергії та природного газу, витрати на енергопродукти у розрахунку на гектар) [16]. Класифікація показників за типами є критично важливою для правильної процедури нормалізації, яка має забезпечити, щоб після нормалізації вищі значення завжди відповідали кращій екологічній ефективності незалежно від початкового типу показника.

Зв'язок кожного показника з конкретними Цілями сталого розвитку ООН забезпечує інтеграцію методології оцінки екологічної ефективності підприємств у глобальну систему моніторингу прогресу у досягненні ЦСР. Представлена система показників пов'язана з вісьмома цілями сталого розвитку: ЦСР 2, ЦСР 3, ЦСР 6, ЦСР 7, ЦСР 8, ЦСР 12, ЦСР 13, ЦСР 15 [12, 17]. Це дозволяє підприємствам не лише оцінювати свою екологічну ефективність, але й демонструвати свій внесок у досягнення глобальних цілей, що має значення для репутації, залучення інвесторів та взаємодії зі стейкхолдерами [18].

Першим етапом побудови інтегрального індексу екологічної ефективності є нормалізація показників. Необхідність нормалізації зумовлена тим, що п'ятнадцять показників, які використовуються для розрахунку індексу ($P_2 - P_{16}$), мають різні одиниці виміру (відсотки, кілограми на гектар, гривні на гектар, кіловат-години на гектар, кубічні метри на гектар, бали, штуки) та суттєво різні масштаби значень. Безпосереднє агрегування таких різномірних показників є математично некоректним, оскільки показники з більшими абсолютними значеннями будуть домінувати у підсумковому індексі незалежно від їх реальної важливості для екологічної ефективності. Нормалізація вирішує цю проблему шляхом приведення всіх показників до єдиного безрозмірного простору в діапазоні $[0; 1]$, де вони стають порівнянними та можуть бути коректно агреговані з використанням об'єктивно визначених ентропійних вагових коефіцієнтів [19].

Так чином, сформуємо вихідну матрицю даних $X = \{x_{ij}\}$ розмірності $m \times n$, де m – кількість підприємств у вибірці, яка аналізується, а n – кількість індикаторів екологічної ефективності (в нашому випадку 16 одиниць). Елемент x_{ij} представляє фактичне значення i -го індикатора для j -го підприємства у його початкових одиницях виміру. Тут задача полягає у перетворенні цієї матриці у нормалізовану матрицю $X^{norm} = \{x_{ij}^{norm}\}$ тієї ж розмірності, де всі елементи належать діапазону від нуля до одиниці.

Процедура нормалізації має враховувати тип індикатора: стимулятор чи дестимулятор. Для індикаторів-стимуляторів застосовується процедура прямої нормалізації, яка перетворює мінімальне значення індикатора у вибірці на нуль, максимальне значення на одиницю, а всі проміжні значення розподіляються пропорційно у цьому діапазоні. Математично це формалізується наступним чином (1) [13, 15, 19]:

$$x_{ij}^{norm} = \frac{x_{ij} - \min_{j=1,...,m} x_{ij}}{\max_{j=1,...,m} x_{ij} - \min_{j=1,...,m} x_{ij}} \quad (1)$$

де $\min_{j=1,...,m} x_{ij}$ – мінімальне значення i -го індикатора серед усіх m підприємств у вибірці, $\max_{j=1,...,m} x_{ij}$ – максимальне значення i -го індикатора у вибірці. Знаменник формули $\max_{j=1,...,m} x_{ij} - \min_{j=1,...,m} x_{ij}$ представляє діапазон варіації індикатора у вибірці. Чисельник $x_{ij} - \min_{j=1,...,m} x_{ij}$ вимірює відстань фактичного значення підприємства від мінімуму у вибірці. Таким чином, формула обчислює частку цієї відстані від повного діапазону варіації, що і дає нормалізоване значення у діапазоні від нуля до одиниці [16].

Для індикаторів-дестимуляторів застосовується процедура оберненої нормалізації, яка має протилежну логіку: мінімальне значення індикатора (яке є найкращим для дестимулятора) перетворюється на одиницю, максимальне значення (найгірше) перетворюється на нуль, а всі проміжні значення розподіляються відповідно у зворотному порядку (2) [13, 15, 19]:

$$x_{ij}^{norm} = \frac{\max_{j=1,...,m} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{j=1,...,m} x_{ij} - \min_{j=1,...,m} x_{ij}} \quad (2)$$

Різниця між цією формулою та попередньою полягає у знаку чисельника: замість $x_{ij} - \min$ використовується $\max - x_{ij}$, що і забезпечує інверсію шкали. Після такої нормалізації дестимулятор поводить як стимулятор: вищі нормалізовані значення відповідають кращій екологічній ефективності.

У випадку, коли всі підприємства у вибірці мають однакове значення певного індикатора, знаменник у формулах нормалізації дорівнює нулю, що призводить до невизначеності. У такому випадку індикатор не несе жодної інформації для диференціації підприємств, і доцільно встановити нормалізоване значення рівним одиниці для всіх підприємств. Математично це можна формалізувати через умовну конструкцію у формулах нормалізації.

Результатом процедури нормалізації є матриця X^{norm} , де всі елементи задовольняють умову $0 \leq x_{ij}^{norm} \leq 1$, всі індикатори мають однакову розмірність (безрозмірні), вищі нормалізовані значення завжди відповідають кращій екологічній ефективності незалежно від початкового типу індикатора. Ця матриця є основою для подальших етапів побудови інтегрального індексу: розрахунку ентропійних ваг та агрегування індикаторів.

Після нормалізації індикаторів постає завдання визначення їх вагових коефіцієнтів для побудови інтегрального індексу як зваженої суми. Традиційний підхід до вирішення цього завдання передбачає залучення групи експертів, які на основі свого професійного судження визначають відносну важливість кожного індикатора. Однак такий підхід має низку суттєвих обмежень. По-перше, експертні оцінки завжди містять елемент суб'єктивності та можуть залежати від особистих переконань, упереджень та компетенції експертів. По-друге, різні групи експертів можуть прийти до суттєво різних вагових коефіцієнтів, що ускладнює порівняння результатів між дослідженнями. По-третє, залучення кваліфікованих експертів вимагає значних витрат часу та фінансових ресурсів, що особливо проблематично для малих підприємств [20].

Метод ентропії Шеннона пропонує альтернативний підхід, який повністю виключає суб'єктивність і визначає вагові коефіцієнти виключно на основі структури даних – розподілу значень індикаторів у вибірці підприємств. Ключова ідея методу полягає у тому, що інформативність (корисність) індикатора для диференціації підприємств визначається ступенем варіації його значень: індикатор з високою варіацією дозволяє чітко розрізнити підприємства між собою і тому має високу інформаційну цінність, тоді як індикатор з майже однаковими значеннями для всіх підприємств не допомагає їх розрізнити і має низьку інформаційну цінність. Метод ентропії формалізує цю інтуїцію через математичний апарат теорії інформації.

Розрахунок ентропійних вагових коефіцієнтів здійснюється у чотири послідовні кроки, кожен з яких має чітке математичне та змістовне обґрунтування [13, 16, 21].

Крок 1: Розрахунок часток підприємств за кожним індикатором. На цьому кроці для кожного індикатора i розраховується частка кожного підприємства j у загальній сумі нормалізованих значень цього індикатора по всій вибірці (3):

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^{norm}}{\sum_{k=1}^m x_{ik}^{norm}} \quad (3)$$

Ця частка p_{ij} показує, яку питому вагу має j -те підприємство у розподілі i -го індикатора. Сума всіх часток для фіксованого індикатора дорівнює одиниці: $\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1$. Таким чином, для кожного індикатора формується дискретний розподіл ймовірностей на множині підприємств, де роль ймовірностей виконують частки p_{ij} . Цей розподіл характеризує, наскільки рівномірно або нерівномірно розподілені значення індикатора між підприємствами.

Крок 2: Розрахунок ентропії за формулою Шеннона. Для кожного індикатора i обчислюється його інформаційна ентропія за класичною формулою Шеннона (4):

$$e_i = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{j=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}) \quad (4)$$

де $\ln$ – натуральний логарифм, m – кількість підприємств у вибірці. Множник $-\frac{1}{\ln(m)}$ є нормувальною константою, яка забезпечує, що ентропія завжди належить діапазону від нуля до одиниці: $0 \leq e_i \leq 1$. Без цієї константи ентропія була б від нуля до $\ln(m)$, що ускладнило б інтерпретацію.

Сума $\sum_{j=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij})$ це основа формули Шеннона. Кожен доданок $p_{ij} \cdot \ln(p_{ij})$ показує наскільки j -те підприємство впливає на загальну невизначеність індикатора. Якщо частка p_{ij} близька до нуля (підприємство має дуже мале значення індикатора відносно інших), то її внесок у ентропію також малий. Якщо частка близька до одиниці (підприємство домінує за цим індикатором), то $\ln(p_{ij})$ близький до нуля, і внесок знову малий. Найбільший внесок дає частка близька до середнього значення $\frac{1}{m}$.

У загальному розумінні, чим ближче ентропія до 1, тим більш рівномірно розподілені значення індикатора між підприємствами. У такому разі індикатор гірше «розрізняє» підприємства, а його інформаційна цінність зменшується. Якщо $e_i = 1$, це свідчить про повністю рівномірний розподіл, коли всі підприємства мають однакові частки $p_{ij} = \frac{1}{m}$. Навпаки, що нижче значення ентропії, то більш концентрованим є розподіл і тим краще індикатор диференціює підприємства. У граничному випадку $e_i = 0$, означає максимальну концентрацію: одне підприємство має частку $p_{ij} = 1$, а всі інші – нуль.

Крок 3: Розрахунок ступеня диверсифікації. Оскільки низька ентропія означає високу інформативність індикатора, а цілю є щоб вагові коефіцієнти прямо відображали саме інформативність, зазвичай вводиться показник ступеня диверсифікації – величину, що доповнює ентропію до одиниці (5):

$$d_i = 1 - e_i \quad (5)$$

Ступінь диверсифікації d_i є прямою мірою інформативності індикатора: чим більше d_i , тим більш інформативним є індикатор. Якщо $e_i = 0$ (максимальна концентрація), то $d_i = 1$ (максимальна інформативність). Якщо $e_i = 1$ (рівномірний розподіл), то $d_i = 0$ (нульова інформативність). Діапазон ступеня диверсифікації: $0 \leq d_i \leq 1$.

Крок 4: Розрахунок нормалізованих вагових коефіцієнтів. На останньому кроці ступені диверсифікації нормалізуються так, щоб їх сума дорівнювала одиниці, що дає остаточні вагові коефіцієнти (6):

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{k=1}^{13} d_k} = \frac{1 - e_i}{\sum_{k=1}^{13} (1 - e_k)} \quad (6)$$

Отримані вагові коефіцієнти w_i задовольняють стандартним вимогам до ваг: всі ваги додатні ($w_i > 0$ за умови, що не всі індикатори мають ентропію рівну одиниці), сума ваг дорівнює одиниці ($\sum_{i=1}^{13} w_i = 1$), індикатори з більшою варіацією (меншою ентропією, більшим ступенем диверсифікації) отримують більші ваги, індикатори з однаковою ентропією отримують однакові ваги [16].

Головна перевага «ентропійних» ваг полягає в їхній повній об'єктивності: вони залежать лише від фактичної структури даних і не містять суб'єктивних припущень. Це забезпечує відтворюваність результатів – дослідники, використовуючи однакові дані, отримають однакові вагові коефіцієнти. Крім того, ентропійні ваги автоматично враховують специфіку вибірки: індикатор із високою варіацією отримує більшу вагу, тоді як індикатор із низькою варіацією –

меншу. Завдяки цьому зростає здатність моделі розрізняти підприємства та її релевантність саме для тієї групи, що аналізується.

Після нормалізації індикаторів та визначення їх ентропійних вагових коефіцієнтів завершальним етапом є побудова інтегрального індексу Е-компоненти шляхом агрегування системи нормалізованих індикаторів з їх вагами. Для цього використовується метод зваженої лінійної агрегації (зваженої суми), який є найбільш поширеним та математично обґрунтованим методом побудови інтегральних індексів у задачах багатокритеріального оцінювання [13, 16].

Інтегральний індекс Е-компоненти для j -го підприємства визначається як зважена сума системи нормалізованих індикаторів з ентропійними вагами (7):

$$IE_j = \sum_{i=1}^{16} w_i \cdot x_{ij}^{norm} = w_1 \cdot x_{1j}^{norm} + w_2 \cdot x_{2j}^{norm} + \dots + w_{16} \cdot x_{16j}^{norm} \quad (7)$$

де IE_j – інтегральний індекс екологічної компоненти для j -го підприємства, w_i – ентропійна вага i -го індикатора, визначена на попередньому етапі, x_{ij}^{norm} – нормалізоване значення i -го індикатора для j -го підприємства. За конструкцією, оскільки всі нормалізовані значення належать діапазону $[0,1]$, всі ваги додатні та їх сума дорівнює одиниці, то й інтегральний індекс належить цьому ж діапазону: $0 \leq IE_j \leq 1$ для всіх підприємств у вибірці.

Ця формула агрегування має кілька важливих математичних властивостей, які роблять її придатною для оцінки екологічної ефективності підприємств. По-перше, інтегральний індекс є обмеженою функцією з чітко визначеними межами. Мінімальне значення $IE_j = 0$ досягається тоді і тільки тоді, коли всі нормалізовані індикатори дорівнюють нулю: $x_{ij}^{norm} = 0$ для всіх $i = 1, \dots, 13$. Це означає, що підприємство має найгірші значення (в рамках даної вибірки) за всіма індикаторами одночасно. Максимальне значення $IE_j = 1$ досягається тоді і тільки тоді, коли всі нормалізовані індикатори дорівнюють одиниці: $x_{ij}^{norm} = 1$ для всіх i . Це означає, що підприємство має найкращі значення за всіма індикаторами одночасно. Всі проміжні значення інтегрального індексу належать інтервалу $(0,1)$ та відображають різні комбінації значень окремих індикаторів [16, 21].

По-друге, інтегральний індекс є монотонно зростаючою функцією за кожним нормалізованим індикатором при фіксованих значеннях інших індикаторів. Математично це означає, що частинна похідна інтегрального індексу за i -м нормалізованим індикатором дорівнює ваговому коефіцієнту цього індикатора (8):

$$\frac{\partial IE_j}{\partial x_{ij}^{norm}} = w_i > 0 \quad (8)$$

Ця властивість гарантує, що покращення значення будь-якого індикатора (тобто зростання його нормалізованого значення) завжди призводить до зростання інтегрального індексу, що узгоджується з інтуїтивним розумінням: поліпшення екологічної ефективності за будь-яким напрямом має позитивно впливати на загальну екологічну ефективність. Величина цього впливу пропорційна ваговому коефіцієнту: індикатори з більшими вагами мають більший вплив на інтегральний індекс. Якщо вага індикатора $w_i = 0,1$, то збільшення нормалізованого значення цього індикатора на 0,1 призведе до зростання інтегрального індексу на $0,1 \times 0,1 = 0,01$.

По-третє, модель зваженої суми є компенсаторною, що означає можливість компенсації низьких значень одних індикаторів високими значеннями інших індикаторів. Математично це виявляється у тому, що підприємство з $x_{1j}^{norm} = 0,5$ та $x_{2j}^{norm} = 0,5$ матиме такий самий внесок від цих двох індикаторів у інтегральний індекс, як і підприємство з $x_{1j}^{norm} = 0,3$ та $x_{2j}^{norm} = 0,7$ (за умови рівних ваг). Компенсаторність є реалістичною властивістю для оцінки екологічної ефективності підприємств, оскільки у практиці малі та середні підприємства часто не можуть досягти високих результатів одночасно за всіма напрямками через обмеженість ресурсів, і вони обирають стратегію фокусування на певних пріоритетних напрямках екологічного вдосконалення. Компенсаторна модель дозволяє адекватно відобразити таку стратегію в інтегральній оцінці.

По-четверте, інтегральний індекс є адитивною функцією, що означає можливість декомпозиції загального індексу на внески окремих індикаторів. Внесок i -го індикатора у інтегральний індекс j -го підприємства визначається як $w_i \cdot x_{ij}^{norm}$. Сума всіх таких внесків дає інтегральний індекс (9):

$$IE_j = \sum_{i=1}^{16} \underbrace{w_i \cdot x_{ij}^{norm}}_{\text{внесок } i\text{-го індикатора}} \quad (9)$$

Ця властивість є важливою для інтерпретації результатів та ідентифікації сильних і слабких сторін підприємства. Аналізуючи внески окремих індикаторів, можна визначити, які саме аспекти екологічної діяльності найбільше сприяють високому рівню інтегрального індексу, а які потребують першочергового вдосконалення.

По-п'яте, якщо розглядати всю вибірку підприємств, середнє значення інтегрального індексу по вибірці дорівнює зваженій сумі середніх значень нормалізованих індикаторів (10):

$$\overline{IE} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m IE_j = \sum_{i=1}^{16} w_i \cdot \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}^{norm} \right) = \sum_{i=1}^{16} w_i \cdot \overline{x_i^{norm}} \quad (10)$$

де $\overline{x_i^{norm}}$ – середнє значення i -го нормалізованого індикатора по вибірці. Це співвідношення показує, що середній рівень екологічної ефективності у вибірці є зваженою комбінацією середніх рівнів за окремими індикаторами, де ваги відображають їх інформативність.

По-шосте, дисперсія інтегрального індексу у вибірці підприємств може бути виражена через дисперсії нормалізованих індикаторів та їх коваріації (11):

$$\sigma^2(IE) = \sum_{i=1}^{16} \sum_{k=1}^{16} w_i w_k \cdot \text{Cov}(x_i^{norm}, x_k^{norm}) \quad (11)$$

де $\text{Cov}(x_i^{norm}, x_k^{norm})$ – коваріація між i -м та k -м нормалізованими індикаторами у вибірці. Коли $i = k$, коваріація перетворюється на дисперсію $\text{Var}(x_i^{norm})$. Це співвідношення показує, що варіація інтегрального індексу залежить не тільки від варіації окремих індикаторів, але й від кореляцій між ними. Якщо індикатори сильно позитивно корельовані між собою, дисперсія інтегрального індексу буде вищою. Якщо індикатори некорельовані або негативно корельовані, дисперсія буде нижчою. Це має значення для інтерпретації: висока дисперсія свідчить про суттєву диференціацію підприємств за екологічною ефективністю, тоді як низька дисперсія може свідчити про їх однорідність.

Таблиця 2

Вихідні дані досліджуваних аграрних підприємств

Показник	П-А	П-Б	П-В*	П-Г	П-Д
П ₁	320	480	750	520	410
П ₂	5	18	52	12	28
П ₃	92	68	38	85	55
П ₄	120	580	1850	280	920
П ₅	8,5	5,2	1,8	7,8	3,6
П ₆	1580	1240	680	1650	920
П ₇	520	380	210	560	295
П ₈	240	185	95	265	130
П ₉	890	670	380	950	510
П ₁₀	3	6	9	4	7
П ₁₁	0	2	5	1	3
П ₁₂	0	1	3	0	1
П ₁₃	1850	1420	720	2050	980
П ₁₄	185	128	42	196	85
П ₁₅	2	12	38	5	18
П ₁₆	2	6	10	3	8

Примітка: ПСП «Вікторія» – П-А; ТОВ «Дашківці» – П-Б; умовне еталонне підприємство – П-В; ФГ «ІРИНА-О.Т.» – П-Г; ТОВ «Селищанське» – П-Д.

Джерело: авторська розробка

У дослідженні для апробації запропонованої методології сформовано модельну вибірку з чотирьох сільськогосподарських підприємств (ПСП «Вікторія», ТОВ «Дашківці», ФГ «ІРИНА-О.Т.», ТОВ «Селищанське»), для яких сформовано систему показників екологічної ефективності. На основі аналізу літератури та практики екологічного менеджменту в агросекторі до вибірки додатково включено умовне еталонне підприємство П-В*, параметри якого відображають найкращі можливі

значення всіх показників у межах розробленої системи. Використання такого еталона дозволяє не лише продемонструвати верхню межу досягненої екологічної ефективності, а й інтерпретувати інтегральний індекс кожного реального підприємства як відносну наближеність до цього ідеального стану. Завдяки поєднанню фактичних даних і умовного еталона забезпечується коректна перевірка чутливості моделі, можливість побудови шкали інтерпретації значень інтегрального індексу та наочне виокремлення резервів підвищення екологічної ефективності для кожного з досліджуваних господарств [22].

Показник P_1 використовується для контексту, а для розрахунку інтегрального індексу використовуються питомі показники P_2 – P_{16} , що забезпечує порівнянність підприємств різного розміру. Така методологічна побудова системи показників зумовлена необхідністю уникнення систематичної помилки масштабу, коли більші за розміром підприємства автоматично отримували б вищі оцінки екологічної ефективності незалежно від реальної інтенсивності впровадження екологічних практик [16]. P_1 виконує роль базового масштабного індикатора, що характеризує розмір господарства та слугує знаменником для розрахунку питомих показників, однак не входить безпосередньо у формулу агрегування індексу. Натомість решта показників, що використовуються для обчислення інтегрального індексу, є відносними величинами: P_2 та P_{15} виражені у відсотках, показники P_3 – P_9 та P_{13} – P_{14} нормовані на один гектар сільськогосподарських угідь, а показники P_{10} – P_{12} та P_{16} представлені у бальній або штучній формі. Використання виключно питомих показників дозволяє зосередитися на оцінці якості екологічного менеджменту, ефективності ресурсокористування та інтенсивності впровадження сталих практик, що є ключовими характеристиками екологічної відповідальності бізнесу в контексті ESG-концепції [13, 21].

Етап 1: Нормалізація показників. Деталізуємо процедуру нормалізації на прикладі показника P_2 (стимулятора) та P_3 (дестимулятора).

Для P_2 :

$$П-А: x^{norm} = \frac{5-5}{47} = 0,000$$

$$П-Б: x^{norm} = \frac{18-5}{47} = 0,277$$

$$П-В: x^{norm} = \frac{52-5}{47} = 1,000$$

$$П-Г: x^{norm} = \frac{12-5}{47} = 0,149$$

$$П-Д: x^{norm} = \frac{28-5}{47} = 0,489$$

Для P_3 :

$$П-А: x^{norm} = \frac{92-92}{54} = 0,000$$

$$П-Б: x^{norm} = \frac{92-68}{54} = 0,444$$

$$П-В: x^{norm} = \frac{92-38}{54} = 1,000$$

$$П-Г: x^{norm} = \frac{92-85}{54} = 0,130$$

$$П-Д: x^{norm} = \frac{92-55}{54} = 0,685$$

Аналогічним чином здійснено обчислення для решти показників (табл. 3).

Таблиця 3

Нормалізовані значення показників

Показник	П-А	П-Б	П-В	П-Г	П-Д	Сума
P_2	0,000	0,277	1,000	0,149	0,489	1,915
P_3	0,000	0,444	1,000	0,130	0,685	2,259
P_4	0,000	0,266	1,000	0,092	0,462	1,821
P_5	0,000	0,493	1,000	0,104	0,731	2,328
P_6	0,072	0,423	1,000	0,000	0,753	2,247
P_7	0,114	0,514	1,000	0,000	0,757	2,386
P_8	0,147	0,471	1,000	0,000	0,794	2,412
P_9	0,105	0,491	1,000	0,000	0,772	2,368
P_{10}	0,000	0,500	1,000	0,167	0,667	2,333
P_{11}	0,000	0,400	1,000	0,200	0,600	2,200
P_{12}	0,000	0,333	1,000	0,000	0,333	1,667
P_{13}	0,150	0,474	1,000	0,000	0,805	2,429
P_{14}	0,071	0,442	1,000	0,000	0,721	2,234
P_{15}	0,000	0,278	1,000	0,083	0,444	1,806
P_{16}	0,000	0,500	1,000	0,125	0,750	2,375
Сума	0,661	6,305	15,000	1,051	9,764	

Джерело: авторська розробка

З таблиці 3 бачимо, що П-В має нормалізоване значення 1,000 за усіма індикаторами, а отже це підприємство демонструє найкращі значення у вибірці за кожним напрямом екологічної діяльності. П-(А) навпаки має нормалізоване значення 0,000 за більшістю індикаторами, що свідчить про найгірші показники у вибірці. Інші досліджувані підприємства мають проміжні значення, які варіюються між цими крайніми точками. Остання колонка таблиці показує суму нормалізованих значень кожного індикатора по досліджуваних підприємствах, яка необхідна для наступного етапу розрахунку ентропійних ваг.

Етап 2: Розрахунок ентропійних вагових коефіцієнтів. Метод ентропії Шеннона визначає вагу кожного показника виключно на основі його інформаційної цінності для диференціації підприємств. Для кожного індикатора послідовно виконуємо чотири кроки методу ентропії Шеннона:

Крок 2.1: Розрахунок часток. Сума нормалізованих значень P_1 по всіх підприємствах дорівнює 1,915 (з таблиці 3). Розраховуємо частку кожного підприємства:

$$p_{2A} = \frac{0}{1,915} = 0,000; p_{2B} = \frac{0,277}{1,915} = 0,145; p_{2B} = \dots = 0,522; p_{2Г} = \dots = 0,078; p_{2Д} = \dots = 0,255.$$

Крок 2.2: Розрахунок ентропії. Обчислюємо вираз $\sum p_{ij} \ln(p_{ij})$:

$$0,000 \times \ln(0,000) + 0,144 \times \ln(0,144) + 0,522 \times \ln(0,522) + 0,078 \times \ln(0,078) + 0,256 \times \ln(0,256) = -1,166$$

Нормуюча константа: $\ln(5) = 1,609$

Ентропія: $e_2 = -(-1,166)/1,609 = 0,725$

Крок 2.3: Визначення ступеня диверсифікації (варіації). Ступінь диверсифікації: $d_2 = 1 - 0,725 = 0,275$.

Аналогічні розрахунки виконуються для всіх інших індикаторів. Результати для всіх індикаторів зведені у таблиці 4.

Крок 2.4: Розрахунок нормалізованих вагових коефіцієнтів. Сума всіх ступенів диверсифікації дорівнює 4,084. Вага кожного індикатора розраховується діленням його ступеня диверсифікації на цю суму. Наприклад, для I_1 : $w_1 = \frac{0,198}{3,256} = 0,061$. Аналогічно для I_{10} : $w_{10} = \frac{0,279}{3,256} = 0,086$. Перевірка: сума усіх вагових коефіцієнтів точно дорівнює 1,000, що підтверджує коректність розрахунків.

Аналогічні розрахунки виконуються для всіх інших показників.

Таблиця 4

Ентропійні характеристики та вагові коефіцієнти п'ятнадцяти показників

Показник	Ентропія (e)	Диверсифікація (d)	Вага (w)	%	Ранг
П ₂	0,725	0,275	0,067	6,7%	6
П ₃	0,750	0,250	0,061	6,1%	10
П ₄	0,689	0,311	0,076	7,6%	3
П ₅	0,742	0,258	0,063	6,3%	8
П ₆	0,715	0,285	0,070	7,0%	4
П ₇	0,749	0,251	0,062	6,2%	9
П ₈	0,758	0,242	0,059	5,9%	12
П ₉	0,742	0,258	0,063	6,3%	7
П ₁₀	0,770	0,230	0,056	5,6%	14
П ₁₁	0,771	0,229	0,056	5,6%	15
П ₁₂	0,590	0,410	0,100	10,0%	1
П ₁₃	0,760	0,240	0,059	5,9%	13
П ₁₄	0,718	0,282	0,069	6,9%	5
П ₁₅	0,685	0,315	0,077	7,7%	2
П ₁₆	0,753	0,247	0,061	6,1%	11
Сума	-	4,084	1,000	100%	-

Джерело: авторська розробка

Аналіз отриманих вагових коефіцієнтів дозволяє зробити кілька важливих висновків щодо відносної інформативності різних аспектів екологічної діяльності для диференціації підприємств у даній вибірці.

По-перше, найвищу вагу отримав індикатор П₁₂ з ваговим коефіцієнтом 0,100 або 10,0% від загальної ваги. Це пояснюється тим, що саме цей індикатор демонструє найбільшу варіацію та найменшу ентропію (0,590), що робить його найбільш інформативним показником для диференціації підприємств за рівнем екологічної ефективності. Високий ваговий коефіцієнт

відображає суттєві відмінності між підприємствами у впровадженні систем екологічного менеджменту та стандартизації практик.

По-друге, до групи найбільш інформативних показників належать індикатори P_4 , P_6 та P_{15} . Високі ваги цих показників свідчать про їхню значущість для диференціації підприємств, пов'язану з біоенергетикою, органічними практиками та використанням відновлюваних джерел енергії. Підприємства, що впроваджують біопаливо та переходять на ВДЕ або органічні методи, чітко виділяються серед конкурентів, що відображено у високих вагових коефіцієнтах.

По-третє, індикатори P_5 , P_7 - P_{11} також демонструють помірну інформативність. Ці показники важливі для оцінки екологічної ефективності, проте їхня варіація між підприємствами нижча, оскільки базові заходи щодо енергоспоживання, електроенергії та управління відходами часто впроваджуються більшістю підприємств.

По-четверте, індикатори P_2 , P_3 , P_{13} , P_{14} та P_{16} посідають нижчі позиції у рейтингу ваг, що пояснюється відносно високою ентропією цих показників (0,689-0,758) та більш рівномірним розподілом значень між підприємствами. Це не зменшує їхньої важливості, але вони менше диференціюють підприємства порівняно з більш специфічними та інноваційними практиками.

Важливо зазначити, що різниця між найвищим (10,0% для P_{12}) та найнижчим (5,6% для P_{10} і P_{11}) ваговим коефіцієнтом становить лише 4,4 відсоткових пункти, що свідчить про відносно збалансований розподіл інформативності між усіма індикаторами. Жоден окремий індикатор не домінує у підсумковій оцінці, і всі вони роблять суттєвий внесок у формування інтегрального індексу екологічної ефективності.

Розподіл вагових коефіцієнтів також відображає специфіку вибірки сільськогосподарських підприємств. Якщо методологія застосовувалася б до промислових підприємств, структура ваг могла б змінитися – зростали б ваги індикаторів енергоспоживання, управління відходами та контролю викидів, а зменшилися б ваги специфічних для сільського господарства індикаторів біодобрив та органічного землеробства. Ця автоматична адаптація вагових коефіцієнтів до специфіки конкретної вибірки є важливою перевагою методу ентропії Шеннона та робить його універсальним для різних секторів економіки..

Етап 3: Розрахунок інтегральних індексів. На завершальному етапі для кожного підприємства обчислюється інтегральний індекс Е-компоненти (табл. 5) як зважена сума системи нормалізованих індикаторів з оновленими ентропійними вагами з таблиці 4.

$$IE_j = \sum_{i=1}^{15} w_i \cdot x_{ij}^{norm}$$

Для П-А :

$$IE_A = 0,067 \times 0 + 0,067 \times 1 + \dots + 0,07 \times 0,072 + 0,059 \times 0,15 + \dots + 0,061 \times 0 = 0,041$$

Інтегральний індекс Е-компоненти для підприємства П-А становить $IE_B = 0,041$, що свідчить про низький рівень екологічної ефективності. Це значення демонструє, що підприємство поки що не досягло значущого прогресу у впровадженні екологічно ефективних практик, таких як використання відновлюваних джерел енергії, органічне землеробство, управління відходами та екосертифікація. Підприємство значно відстає від інших учасників вибірки, і йому слід активізувати заходи зі сталого розвитку та підвищення екологічної відповідальності, щоб покращити свої показники.

Аналогічно розраховуються інтегральні індекси для інших чотирьох підприємств вибірки. Для підприємства П-В, який є умовно еталонним у даній вибірці та має максимальні нормалізовані значення (1,000) за всіма індикаторами, інтегральний індекс очевидно досягає свого теоретичного максимуму:

$$IE_B = \sum_{i=1}^{16} w_i \times 1,000 = \left(\sum_{i=1}^{16} w_i \right) \times 1,000 = 1,000 \times 1,000 = 1,000$$

Для підприємств з проміжними характеристиками розрахунки дають: $IE_B = 0,411$, $IE_T = 0,066$, $IE_D = 0,633$.

Так, підприємство П-Д показує високий рівень з індексом 0,633, що приблизно на 37% нижче еталону. П-Б (0,411) перебуває на помірному рівні з потенціалом покращення близько 58,9%. Підприємства П-Г (0,066) та П-А (0,041) перебувають на низькому рівні екологічної ефективності, потребуючи системних заходів з екологічної модернізації та впровадження сталих практик.

Таблиця 5

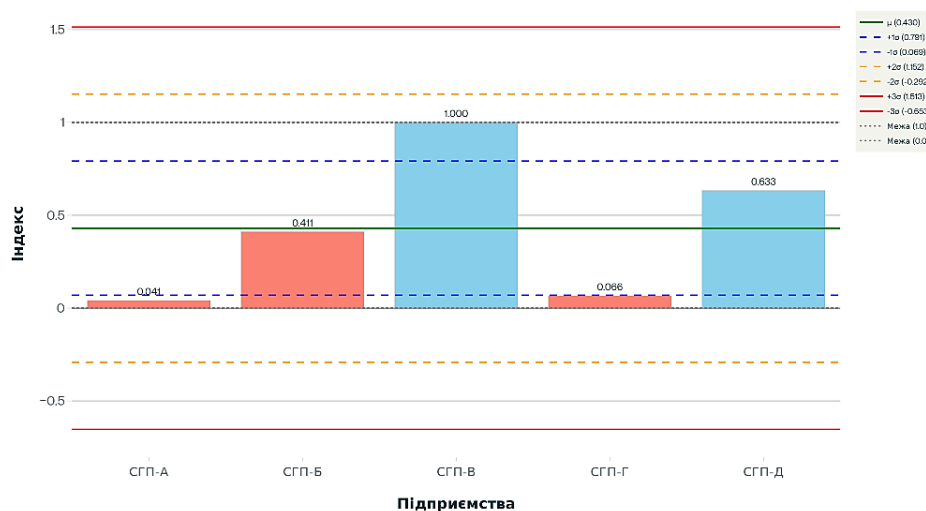
Інтегральні індекси екологічної ефективності та їх інтерпретація

Підприємство	Інтегральний індекс (ІЕ)	Ранг	Рівень	Характеристика
П-А	0,041	5	Критичний	Мінімальні показники за всіма напрямками
П-Б	0,411	3	Середній	Базові екологічні практики впроваджені
П-В*	1,000	1	Лідерський	Еталонне підприємство за всіма критеріями
П-Г	0,066	4	Критичний	Систематичні проблеми екоефективності
П-Д	0,633	2	Високий	Просунуті екологічні технології
Середнє	0,430			Середній рівень по вибірці
Станд. відхилення	0,361			Висока варіація
Розмах	0,959			Максимальна диференціація

Джерело: авторська розробка

Результати розрахунків демонструють значну диференціацію підприємств за рівнем екологічної ефективності з фактичним охопленням майже всього можливого діапазону від 0,041 до 1,000. Середнє значення інтегрального індексу по вибірці становить 0,430, що свідчить про помірний рівень ефективності серед підприємств. Стандартне відхилення 0,361 (приблизно 84% від середнього) вказує на значну варіабельність досліджуваної ознаки, тобто суттєві відмінності у рівні екологічної ефективності між окремими підприємствами.

Для оцінки статистичної коректності вибірки та виявлення можливих аномальних значень застосовано правило трьох сигм (3σ). Цей метод дозволяє визначити межі, в які за нормального розподілу мають потрапляти практично всі значення генеральної сукупності (99,7%). Значення, що виходять за межі інтервалу $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$, вважаються статистичними викидами, спричиненими грубими помилками вимірювання або іншими факторами, які потребують додаткового аналізу або виключення з вибірки. У контексті екологічної ефективності підприємств застосування правила 3σ дає змогу: ідентифікувати підприємства з аномальними показниками; оцінити коректність вихідних даних; обґрунтувати придатність вибірки для подальшого статистичного моделювання. Розрахункові контрольні межі становлять: нижня межа $\mu - 3\sigma = -0,653$, верхня межа $\mu + 3\sigma = 1,513$.

Рис. 1. Розподіл інтегральних індексів за правилом 3σ

Джерело: авторська розробка

Аналіз розподілу інтегральних індексів за правилом 3σ підтверджує статистичну однорідність досліджуваної вибірки у сенсі відсутності аномальних спостережень. Усі п'ять значень (0,041; 0,066; 0,411; 0,633; 1,000) потрапляють у розрахунковий інтервал $[-0,653; 1,513]$, що свідчить про відсутність викидів, спричинених помилками збору чи обробки даних. Враховуючи природне

обмеження діапазону індексу $[0; 1]$, фактичні межі розподілу звужуються до цього інтервалу, всередині якого зосереджені всі підприємства.

Тут важливо розрізнити два аспекти аналізу вибірки. Статистична однорідність за критерієм 3σ означає, що всі спостереження належать до однієї генеральної сукупності без аномальних елементів. Водночас високий коефіцієнт варіації (84%) відображає об'єктивну диференціацію підприємств за рівнем екологічної ефективності – великий розкид значень у межах статистично коректної вибірки. Така варіабельність є характерною для перехідного стану аграрного сектору України і потребує розроблення диференційованих управлінських стратегій для різних груп підприємств – від критично низького (П-А з індексом 0,041, П-Г з індексом 0,066) до еталонного (П-В з індексом 1,000) рівня екологічної ефективності.

Для практичного застосування інтегрального індексу розроблено п'ятирівневу класифікаційну шкалу з детальними характеристиками та рекомендаціями (табл. 6).

Таблиця 6

Класифікаційна шкала рівнів екологічної ефективності

Рівень	Діапазон ІЕ	Характеристика	Пріоритетні заходи	Підприємства
Критичний	$[0,00; 0,20)$	Відсутність системного екологічного менеджменту, високе хімічне навантаження, максимальна енергоємність	Невідкладне зниження агрохімікатів, впровадження енергозбереження, базове управління відходами	П-А, П-Г
Низький	$[0,20; 0,40)$	Формальне дотримання мінімальних екологічних вимог, фрагментарні заходи	Розробка екологічної стратегії, поступове впровадження біодобрив, початок переходу на ВДЕ	-
Середній	$[0,40; 0,60)$	Базові системи екологічного управління, середні показники по галузі	Сертифікація ISO 14001, збільшення частки органічних угідь, установки переробки відходів	П-Б
Високий	$[0,60; 0,80)$	Систематичне впровадження екологічних практик, показники вище середніх	Розширення ВДЕ до 25-30%, органічна сертифікація, біопаливні проекти	П-Д
Лідерський	$[0,80; 1,00]$	Еталонний рівень екологічної ефективності, інноваційні технології	Досягнення 50%+ ВДЕ, повна циркулярність відходів, менторство для інших МСП	П-В*

Джерело: авторська розробка

Аналіз інтегральних індексів Е-компоненти показав значну диференціацію підприємств за рівнем екологічної ефективності. У вибірці спостерігаються підприємства з критично низькими показниками (П-А, П-Г), середніми (П-Б), високими (П-Д) та лідерським рівнем (П-В*). Це відображає неоднорідність практик екологічного управління, використання відновлюваних джерел енергії, органічного землеробства та управління відходами.

Вибірка підприємств демонструє широкий розкид інтегральних показників, що вказує на потребу диференційованого підходу до підвищення екологічної ефективності. Критично слабкі підприємства потребують системної модернізації та впровадження базових екологічних практик, тоді як середні та високі показники свідчать про наявність прогресивних заходів і потенціал для подальшого розвитку. Лідери демонструють приклад комплексного впровадження екологічних інновацій, до яких можна орієнтуватися іншим підприємствам.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Розроблено комплексну науково обґрунтовану методологію моделювання інтегрального індексу екологічної ефективності сільськогосподарських підприємств на основі системи шістнадцяти показників із застосуванням математичного апарату теорії інформації та методу ентропії Шеннона для об'єктивного визначення вагових коефіцієнтів.

Розроблено математичний апарат нормалізації показників різних типів (стимулятори та дестимулятори) для приведення їх до безрозмірного вигляду у діапазоні $[0; 1]$. Застосування питомих показників у розрахунку на гектар забезпечує порівнянність підприємств різного розміру.

Тестування на вибірці показників продемонструвала високу дискримінантну здатність

методології з інтегральними індексами від 0,041 до 1,000, що свідчить про значну різницю в рівні екологічної ефективності. Найвищі вагові коефіцієнти отримали показники екосертифікації (10,0%), частки ВДЕ (7,7%), біодобрив (7,6%) та витрат енергопродуктів (7,0%), що відображає їх ключову роль у диференціації підприємств за екологічною ефективністю.

Практична значущість методології полягає у створенні об'єктивного інструментарію для комплексної діагностики, бенчмаркінгу, обґрунтування інвестицій у екологічну модернізацію, ESG-рейтингування та моніторингу прогресу у досягненні Цілей сталого розвитку ООН у аграрному секторі.

Перспективи досліджень включають дослідження зв'язків між екологічними та фінансовими показниками, а також формування системи динамічних бенчмарків для оцінки прогресу підприємств.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Метелиця В., Гагалюк Т., Краєвський В. ESG-звітність в агросекторі України: емпіричний аналіз і шляхи інтеграції до FSDN. *Український економічний часопис*. 2025. № 10. С. 54-65. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8273/2025-10-9>
2. Мірзоева Т., Герасимчук Н. Щодо оцінки ризиків агробізнесу в контексті ESG-стратегії розвитку. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 58. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-22>
3. Лагодієнко О.В. Ключові аспекти та підходи управління ESG-програмами на підприємствах агропромислового комплексу України. *Бізнес Інформ*. 2024. №7. С. 290-297. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-7-290-297>
4. Устік Т.В. ESG-маркетинг в агросекторі: адаптація українських підприємств до міжнародних стандартів сталого розвитку. *Журнал з менеджменту, економіки та технологій*. 2025. № 2. С. 16-32. DOI: <https://doi.org/10.69803/3083-6034-2025-2-16>
5. Китайчук Т.Г., Покинйчереда В.В. ESG-звітність в Україні: перспективи, виклики та дорожня карта впровадження. *Інклюзивна економіка*. 2025. №. 2 (08). С. 23-28. DOI: https://doi.org/10.32782/inclusive_economics.8-4
6. Лівашко Т. Моніторинг за ESG-принципами та його вплив на конкурентоспроможність суб'єктів господарювання. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Економічні науки*. 2022. Т. 1, № 5. С. 158-164. DOI: [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-310-5\(1\)-26](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-310-5(1)-26)
7. Скорик М., Мужайло Р. (2025). Модель сталого розвитку агробізнесу: синергія циркулярності, ESG-стандартів і соціального партнерства. 2025. *Український економічний часопис*. № 9. С. 136-142. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8273/2025-9-23>
8. Карташова О.Г.. Забезпечення екологічної безпеки в аграрному секторі. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2021. № 2 (77). С. 137-142. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.2.17>
9. Россоха В.В., Нечипоренко О.М. Прогнозування економічної ефективності сільськогосподарського підприємства: можливості і обмеження. *Агровіт*. 2023. № 1-3. С. 3-9. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2023.1.3>
10. Коляденко С., Дзісь О., Гайдей В. Перспективні напрями цифровізації аграрних підприємств у контексті економічної безпеки. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 59. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-84>
11. Гончарук І.В., Березюк С.В., Токарчук Д.М., Подолянчук О.А. Екологічне оподаткування в концепції соціальної відповідальності громадян. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2024. № 3 (69). С. 7-25. DOI: <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2024-3-1>
12. 17 Цілей сталого розвитку. URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/> (дата звернення: 07.12.2025).
13. Chikov I. Development of a Scorecard and a Mathematical Model for an Aggregated Assessment of the G-component of Small and Medium-Sized Enterprises of the Agro-Industrial Complex within the Framework of the ESG Conception. *The Problems of Economy*. 2025. № 3. P. 160-175. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-3-160-175>
14. Kaletnik G., Honcharuk I., Yemchyk T., Okhota, Y. The world experience in the regulation of the land circulation. *European Journal of Sustainable Development* 2020. Vol. 9 (2), P. 557-568. DOI: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n2p557>
15. Okhota Y., Chikov I., Bilokinna I. Conceptual polycomponent model of an innovative mechanism for improving the competitiveness of agro-industrial complex enterprises. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2024. Vol. 10, No. 2. P. 196-210. DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2024-10-2-196-210>

16. Гончарук І.В., Охота Ю.В., Чіков І.А. Забезпечення інноваційної конкурентоспроможності підприємств АПК: теорія, методологія, практика. Монографія. Вінниця: ПрАТ «Віноблдрукарня». 2024. 275 с.
17. Chikov I., Radko V., Marshalok M., Tepluk M., Petrenko O., Sharko I., Sitkovska A. Economic development of agricultural food enterprises on an innovative basis. *Financial and credit activity-problems of theory and practice*. 2022. Vol. 1 (42). P. 98-106. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptp.1.42.2022.3672>
18. Zaremba O., Sakhno A., Chesnik N., Nitsenko V., Chikov I., Zakharova T., Boltovska L. Capital Investments in Sustainable Development of Land Resources of Ukrainian Agrarian and Industrial Complex Enterprises: Assessment, Modeling, Optimization. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2025. Vol. 27, P. 722-737. DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2025.058>
19. Chikov I., Khaietska O., Okhota Yu., Titov D., Prygotsky V., Nitsenko V. Modeling of the synthetic indicator of competitiveness of agricultural enterprises: a methodological approach to the use of neural network tools. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*. 2023. Vol. 5(52), P. 222-242. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptp.5.52.2023.4149>
20. Chikov I., Titov D. Expert system for determining strategic directions for ensuring the stable functioning of agricultural enterprises and rural areas. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2025. Vol. 11(4). P. 238-251. DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2025-11-4-238-251>
21. Dotsiuk S., Chikov I., Shevchenko O., Nitsenko V., Gerasymchuk N. Evaluation of the institutional development of innovative activities to ensure the economy of the state. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. № 3. P. 171-180. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/171>
22. Okhota Y., Dotsiuk S. Directions for increasing the competitiveness of enterprises of the AIC based on an adaptive mechanism of response to changes in the operating environment. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2025. Vol. 11(4). P. 344-356. DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2025-11-4-344-356>.

REFERENCES:

1. Metelytsia, V., Gagalyuk, T., Krayevskyy, V. (2025). ESG reporting in Ukraine's agricultural sector: empirical insights and pathways to integration with the FSDN. *The Ukrainian Economic Journal*, 10, 54-65. <https://doi.org/10.32782/2786-8273/2025-10-9>
2. Mirzoieva, T., Gerasymchuk, N. (2023). Regarding agribusiness risks assessment in the context esg development strategies. *Economy and Society*, 58. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-58-22>
3. Lagodiyenko, O. (2024). The Key Aspects and Approaches of Management of ESG Programs at Enterprises of the Agricultural Complex of Ukraine. *Business Inform*, 7, 290-297. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-7-290-297>
4. Ustik, T. (2025) ESG-marketing in the agricultural sector: adapting ukrainian agricultural firms to international standards of sustainable development. *Journal of Management, Economics and Technology*, 2, 16-32. DOI: <https://doi.org/10.69803/3083-6034-2025-2-16>
5. Kytaichuk, T., Pokyncherda, V. (2025) ESG reporting in Ukraine: prospects, challenges, and a roadmap for implementation. *Inclusive Economics*, 2 (08), 23-28. DOI: https://doi.org/10.32782/inclusive_economics.8-4
6. Livoshko, T. (2022). Monitoring according to esg principles and its impact on the competitiveness of business entities. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 310(5(1)), 158-164. [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-310-5\(1\)-26](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-310-5(1)-26)
7. Skoryk, M., Muzhailo, R. (2025). Model of sustainable development of agricultural enterprises: synergy of circularity, ESG standards and social partnership. *The Ukrainian Economic Journal*, 9, 136-142. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8273/2025-9-23>
8. Kartashova, O. (2022) Ensuring environmental safety in the agricultural sector. *VISNYK of Kherson National Technical University*, 2 (77), 137-142. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.2.17>
9. Rossokha, V., Nechyporenko, O. (2023) Forecasting the economic efficiency of an agricultural enterprise: opportunities and limitations. *Agrosvit*, 1, 3-9. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2023.1.3>
10. Koliadenko, S., Dzis, O., Haidei, V. (2024). Prospective directions of digitalization in agricultural enterprises within the context of economic security. *Economy and Society*, 59. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-84>
11. Honcharuk, I., Bereziuk, S., Tokarchuk, D., Podolanchuk, O. (2024) Environmental taxation in the concept of social responsibility of citizens. *Economy, finance, management: topical issues of science and practical activity*, 1, 39, 7-25 DOI: <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2024-3-1>
12. 17 Tsilei staloho rozvytku [17 Sustainable development goals]. URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/>
13. Chikov, I. (2025) Development of a Scorecard and a Mathematical Model for an Aggregated Assessment of the G-component of Small and Medium-Sized Enterprises of the Agro-Industrial Complex within the Framework of the ESG Conception. *The Problems of Economy*, 3, 160-175. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-3-160-175>
14. Kaletnik G., Honcharuk I., Yemchuk T., Okhota, Y. (2020) The world experience in the regulation of the land circulation. *European Journal of Sustainable Development*, 9 (2), 557-568. DOI: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n2p557>
15. Okhota Y., Chikov I., Bilokinna I. (2024) Conceptual polycomponent model of an innovative mechanism for improving the competitiveness of agro-industrial complex enterprises. *Baltic Journal of Economic Studies*, 10, 2, 196-210. DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2024-10-2-196-210>
16. Honcharuk, I. V., Okhota, Yu. V., & Chikov, I. A. (2024). Zabezpechennia innovatsiinoi konkurentospromozhnosti pidpriemstv APK: teoriia, metodolohiia, praktyka [Ensuring innovative competitiveness of agricultural enterprises: theory,

methodology, practice]. Vinnytsia: PrAT «Vinobldrukarnia».

17. Chikov I., Radko V., Marshalok M., Tepliuik M., Petrenko O., Sharko I., Sitkovska A. (2022) Economic development of agricultural food enterprises on an innovative basis. *Financial and credit activity-problems of theory and practice*, 1 (42), 98-106. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptop.1.42.2022.3672>

18. Zarembo O., Sakhno A., Chesnik N., Nitsenko V., Chikov I., Zakharova T., Boltovska L. (2025) Capital Investments in Sustainable Development of Land Resources of Ukrainian Agrarian and Industrial Complex Enterprises: Assessment, Modeling, Optimization. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 27, 722-737. DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2025.058>

19. Chikov I., Khaietska O., Okhota Yu., Titov D., Prygotsky V., Nitsenko V. (2023) Modeling of the synthetic indicator of competitiveness of agricultural enterprises: a methodological approach to the use of neural network tools. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, 5 (52), 222-242. DOI: <https://doi.org/10.55643/fcaptop.5.52.2023.4149>

20. Chikov I., Titov D. (2025) Expert system for determining strategic directions for ensuring the stable functioning of agricultural enterprises and rural areas. *Baltic Journal of Economic Studies*, 11(4), 238-251. DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2025-11-4-238-251>

21. Dotsiuk S., Chikov I., Shevchenko O., Nitsenko V., Gerasymchuk N. (2024) Evaluation of the institutional development of innovative activities to ensure the economy of the state. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 171-180. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/171>

22. Okhota Y., Dotsiuk S. (2025) Directions for increasing the competitiveness of enterprises of the AIC based on an adaptive mechanism of response to changes in the operating environment. *Baltic Journal of Economic Studies*, 11(4), 344-356. DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2025-11-4-344-356>

MODELING OF THE E-COMPONENT INTEGRAL INDEX BASED ON A MULTILEVEL SYSTEM OF INDICATORS

OKHOTA Yuliia, CHIKOV Illia
Vinnytsia National Agrarian University

The article develops a scientifically grounded methodology for modeling an integral index of environmental efficiency (E-component of the ESG system) for small and medium-sized agricultural enterprises in Ukraine. Key methodological problems in constructing integral indices related to the subjectivity of expert assessment, heterogeneity of indicators, and complexity of their aggregation into a single comprehensive indicator are analyzed. Based on information theory and the Shannon entropy method, an objective approach to determining weight coefficients is proposed, which relies exclusively on data structure without involving expert judgments. A system of environmental efficiency indicators has been developed, where each indicator is classified by impact type and linked to corresponding UN Sustainable Development Goals. Particular attention is paid to the mathematical apparatus of the methodology: normalization of heterogeneous indicators, calculation of entropy weight coefficients, and aggregation using the weighted linear sum method.

The mathematical apparatus of the methodology encompasses three sequential stages. The first stage involves normalization of indicators using the min-max method to transform heterogeneous data into a dimensionless form within the range from zero to one, with direct normalization applied to stimulator indicators and inverse normalization to destimulator indicators, ensuring that higher normalized values always correspond to better environmental efficiency regardless of the original indicator type. The second stage determines entropy weight coefficients through a four-step algorithm based on the Shannon entropy method: calculating enterprise shares for each indicator, computing information entropy that measures the uniformity of value distribution, determining the degree of diversification as a complement of entropy to unity, and calculating normalized weights where indicators with higher variation receive greater weights due to their higher information value for differentiating enterprises. The third stage aggregates normalized indicators with entropy weights into an integral index using the weighted linear sum method, where the resulting index possesses properties of boundedness within the zero to one interval, monotonicity with respect to each indicator, compensatory nature allowing trade-offs between indicators, and additivity enabling decomposition into individual indicator contributions for identifying improvement reserves. The methodology was tested on a sample of four real agricultural enterprises and one hypothetical benchmark enterprise, which demonstrated the high discriminant ability of the model. A five-level classification scale for interpreting integral index values is proposed: critical, low, medium, high, and leading levels of environmental efficiency. The research results can be used in formulating ESG strategies for agricultural enterprises, justifying investments in environmental modernization, benchmarking, and monitoring progress toward achieving the Sustainable Development Goals.

Keywords: integral index; ESG; environmental efficiency; agricultural enterprises; Shannon entropy; normalization of indicators; biofertilizers; renewable energy sources; waste management; organic farming.