

А. М. ОНИЩЕНКО

доктор економічних наук,
професор кафедри інформаційних систем та технологій
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ORCID: 0000-0003-3975-8946

О. П. ОСТАПЕНКО

кандидат економічних наук,
начальник кафедри фінансового забезпечення військ
Військовий інститут
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID: 0000-0003-3194-0372

А. А. ЛОЙШИН

доктор філософії,
заступник начальника військового інституту з навчальної роботи
Військовий інститут
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID: 0000-0003-2769-9336

ІНТЕГРОВАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ СТАЛИМ РОЗВИТКОМ НА ЗАСАДАХ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ

У статті запропоновано інтегровану інформаційну модель управління сталим розвитком, яка об'єднала в єдиний цифровий аналітичний контур екологічні та економічні індикатори. Мета дослідження полягає у розробці інтегрованої інформаційної моделі управління сталим розвитком на засадах еколого-економічного аналізу, яка включає структурно-функціональну архітектуру, математичні підмоделі екологічних та економічних індикаторів, алгоритми їх інтеграції та обрахунок індексів узагальненого оцінювання сталості. Для досягнення мети формалізовано математичні оператори нормалізації, агрегування та інтеграції, що використовуються для побудови узагальненого індексу сталого розвитку (SRI), та проведено реалізацію системи в IT-середовищі. У рамках методології визначено множини об'єктів, індикаторів та часових періодів, представлено формалізовану структуру даних та багатоваріантну архітектуру системи, яка включає модулі збору, збереження, обробки та візуалізації даних. Для оцінювання ефективності моделі проведено експериментальне навантажувальне тестування, у межах якого кількість показників збільшувалася від 10 до 10 000 на один об'єкт. Результати продемонстрували передбачуване лінійне зростання часу обробки, стабільність роботи інтеграційного модуля та відсутність критичних ресурсних обмежень. Зростання використання CPU і RAM відповідає поведінці високонанвантажених систем багатовимірного аналізу та узгоджується з сучасними науковими дослідженнями в галузі цифрової сталості. Отримані результати підтверджують практичну придатність моделі для застосування в екологічному та економічному моніторингу, промислових та муніципальних системах управління, а також визначають перспективи подальшого розвитку архітектури.

Ключові слова: інтегровані IT-моделі; сталий розвиток; еколого-економічний аналіз; цифрові платформи; системи підтримки прийняття рішень.

А. М. ONYSHCHENKO

Doctor of Economic Sciences,
Professor at the Department of Information Systems and Technologies
Taras Shevchenko National University of Kyiv
ORCID: 0000-0003-3975-8946

О. П. OSTAPENKO

Candidate of Economic Sciences,
Head of the Department of Financial Support for the Troops
Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv
ORCID: 0000-0003-3194-0372

A. A. LOISHYN

Doctor of Philosophy,

Deputy Chief of the Military Institute for Academic Affairs

Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv

ORCID: 0000-0003-2769-9336

INTEGRATED INFORMATION MODELS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT MANAGEMENT BASED ON ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ANALYSIS

The article proposes an integrated information model of sustainable development management, which combines environmental and economic indicators into a single digital analytical circuit. The purpose of the study is to develop an integrated information model of sustainable development management based on environmental and economic analysis, which includes a structural and functional architecture, mathematical submodels of environmental and economic indicators, algorithms for their integration and calculation of generalized sustainability assessment indices. To achieve the goal, the mathematical operators of normalization, aggregation and integration used to construct a generalized sustainability index (SRI) were formalized, and the system was implemented in an IT environment. Within the framework of the methodology, sets of objects, indicators and time periods are defined, a formalized data structure and a multilayer architecture of the system are presented, which includes modules for data collection, storage, processing and visualization. To assess the effectiveness of the model, experimental load testing was conducted, within which the number of indicators increased from 10 to 10,000 per object. The results demonstrated the expected linear growth of processing time, the stability of the integration module and the absence of critical resource constraints. The increase in CPU and RAM usage corresponds to the behavior of high-load multidimensional analysis systems and is consistent with modern scientific research in the field of digital sustainability. The results obtained confirm the practical suitability of the model for use in environmental and economic monitoring, industrial and municipal management systems, and also determine the prospects for further development of the architecture.

Key words: integrated IT models; sustainable development; ecological and economic analysis; digital platforms; decision support systems.

Постановка проблеми

Сталий розвиток дедалі більше залежить від здатності соціально-економічних систем оптимізувати використання ресурсів, мінімізувати екологічні ризики та забезпечувати довгострокову економічну стабільність. У цих умовах цифровізація та використання інформаційних технологій стають ключовими інструментами підтримки управлінських рішень, пов'язаних із балансуванням екологічних та економічних параметрів.

Однак, попри значну кількість окремих екологічних моделей (наприклад, оцінка викидів, LCA-аналіз, еко-індикатори) та економічних моделей (розрахунок витрат, ефективності, ресурсної продуктивності), інтегровані інформаційні моделі, які б поєднували ці два напрями в єдиному аналітичному контурі, залишаються недостатньо розробленими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження у сфері цифрової сталості демонструють швидку еволюцію наукової думки від розрізнених екологічних та економічних підходів до комплексних інтегрованих моделей, де цифрові технології розглядаються як ключовий каталізатор сталого розвитку та в системах підтримки прийняття рішень. Значна частина сучасної літератури формує концептуальну основу для розуміння того, як цифровізація трансформує традиційні бізнес-моделі та забезпечує їх екологічну адаптивність.

Низка досліджень підкреслюють роль цифрових інновацій у формуванні сталих бізнес-моделей, так у роботі [1] показано, що цифрові технології не лише оптимізують операційні процеси, а й дозволяють організаціям інтегрувати екологічні орієнтири у ядро бізнес-моделі, а дослідження [2] доповнює цю позицію, наголошуючи, що цифрові інновації створюють нові механізми протидії зміні клімату шляхом зміни ринкових практик.

В роботі [3] представлена інтегрована соціально-економіко-екологічна модель сталого розвитку через концепцію "sustainableism". Ширша міждисциплінарна перспектива подана в роботі [4], де інформаційні системи розглядаються як основа для циркулярної економіки. Робота [5] підкреслює формування нових механізмів впровадження екологічно відповідальних практик у виробництві через цифрова орієнтацію на сталість, тоді як класична робота [6] забезпечує фундамент для опису бізнес-моделей як багатовимірних інформаційних конструкцій.

Багато наукових досліджень присвячено еколого-економічному моделюванню, яке слугує базою для створення інтегрованих індексів сталого розвитку. У роботі [7] вперше запропоновано агентно-орієнтовану модель оцінки екологічно-економічної політики, яка демонструє взаємозалежність ринкових та природоохоронних механізмів. Робота [8] підтверджує ефективність agent-based моделювання на великому регіональному прикладі, показуючи еволюцію екосистеми сталого розвитку в басейні річки Хуанхе.

Дослідження [9] розкриває взаємозв'язок між глобалізацією, технологічним розвитком та екологічним слідом на рівні домогосподарств, тоді як в роботі [10] наголошують на ролі інституційного управління та людського капіталу в забезпеченні сталості.

Наочне практичне застосування цифровізації в зеленій трансформації представлено в роботі [11], де досліджують цифрові драйвери green innovation в контексті Industry 5.0, наголошуючи на ролі цифрової гнучкості та мереж DGI, та роботі [12], де доводять статистично значущий вплив цифрової економіки на сталий розвиток і можливості ІКТ щодо зниження екологічного навантаження.

Окремий блок літератури стосується платформної економіки та boundary-resources моделей, що є важливим для формування ІТ-архітектури інтегрованих моделей сталості. В роботі [13] сформовано теоретичну основу boundary resources як механізму балансу між контролем платформи та внеском зовнішніх розробників. Автори роботи [14] деталізують, як механізми input control впливають на рішення комплементорів приєднуватися до цифрових платформ – це критично важливо для будь-якої інтегрованої системи збору даних, описаної в нашій моделі.

А роботі [15] розкриваються практики сталих стартапів та інноваційних екосистем та представляє інтелектуальну карту знань про сталих інноваційних підприємців та тренди екосистемної трансформації, що допомагає зрозуміти практичні напрями впровадження цифрових сталих моделей.

Але попри значний прогрес досліджень у напрямках цифрової сталості, екологічної економіки та цифрових бізнес-моделей, наявні підходи залишаються фрагментованими як з точки зору методології, так і з точки зору ІТ-реалізації. Роботи [1, 5, 15], присвячені цифровим сталим бізнес-моделям та цифровій підприємницькій діяльності, переважно зосереджуються на концептуальному описі трансформації бізнес-процесів, змінах у логіці створення цінності та ролі цифрових інновацій у досягненні Цілей сталого розвитку.

Водночас ці дослідження майже не пропонують формалізованих еколого-економічних моделей, які можна безпосередньо інтегрувати в інформаційні системи для кількісної оцінки сталості на рівні підприємств чи територіальних утворень. Класичні фреймворки бізнес-моделей [6] також не містять чітко визначених механізмів інтеграції екологічних показників у ядро ІТ-архітектури підтримки управлінських рішень. Це визначає кілька ключових прогалин в сучасних дослідженнях і потребує:

- 1) узагальнення інтегрованої інформаційної моделі, яка одночасно враховує екологічні, економічні та цифрові параметри сталого розвитку;
- 2) зменшення розриву між теоретичними еколого-економічними моделями та реальними ІТ-архітектурами, які працюють із даними підприємств, територіальних громад чи галузей;
- 3) розробки уніфікованих підходів до інтеграції математичних моделей з архітектурою цифрових платформ, включно з описом шарів збору, обробки, агрегування та візуалізації даних у контексті управління сталим розвитком.

Формулювання мети дослідження

Мету дослідження можна представити як розробку інтегрованої інформаційної моделі управління сталим розвитком на засадах еколого-економічного аналізу, яка включає структурно-функціональну архітектуру, математичні підмоделі екологічних та економічних індикаторів, алгоритми їх інтеграції та обрахунок індексів узагальненого оцінювання сталості.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методи

Методологія дослідження спрямована на побудову інтегрованої інформаційної моделі управління сталим розвитком, яка поєднує екологічні та економічні показники в єдиному аналітичному контурі. Базове припущення полягає в тому, що сталий розвиток певної системи (території, підприємства, галузі) може бути описаний через сукупність вимірюваних індикаторів, які відносяться до двох підсистем – екологічної та економічної, – а також через інтегральний індекс сталості, що формується на їх основі.

Для вирішення проблеми зменшення розриву між теоретичними еколого-економічними моделями та реальними ІТ-архітектурами пропонується ввести кілька послідовних кроків для підготовки моделі:

1. Формалізація об'єкта дослідження як множини елементів (територій, підприємств, сценаріїв), для яких відбувається оцінювання сталого розвитку у дискретні моменти часу.
2. Виділення екологічної та економічної підсистем та формування відповідних векторів показників, що відображають стан кожної підсистеми.
3. Нормалізація та уніфікація індикаторів з метою приведення їх до безрозмірної шкали, придатної для агрегування.
4. Побудова інформаційної структури моделі, що включає схему потоків даних, модулі обробки (нормалізація, зважування, агрегування) та модуль візуалізації результатів.
5. Формування інтегрального індексу сталого розвитку, який поєднує екологічні та економічні компоненти за допомогою вагових коефіцієнтів та багатокритеріальних методів.
6. Реалізація ІТ-моделі у вигляді програмного прототипу, що дозволяє виконувати обчислення для різних сценаріїв та наборів даних.

Тоді інтегрована інформаційна модель може розглядатись як впорядкована сукупність:

$$M = \langle O, T, E, C, \Phi_{norm}, \Phi_{agg}, SRI \rangle, \quad (1)$$

де O – множина об’єктів або сценаріїв оцінювання;
 T – множина дискретних моментів або періодів часу;
 E – екологічні показники;
 C – економічні показники;
 Φ_{norm} – оператори нормалізації;
 Φ_{agg} – оператори агрегування;
 SRI – узагальнений індекс сталого розвитку (Sustainability Rate Index).

Розглянемо систему об’єктів, для яких здійснюється еколого-економічне оцінювання, для чого опишемо множину об’єктів (наприклад, підприємств, муніципалітетів, сценаріїв розвитку) і множину дискретних моментів часу (роки, квартали, часові інтервали моделювання):

$$\begin{aligned} O &= \{o_1, o_2, \dots, o_N\}, \\ T &= \{t_1, t_2, \dots, t_T\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для кожного об’єкта $o_i \in O$ та моменту часу $t_j \in T$ визначається вектор екологічних показників:

$$E_i(t) = (E_{i1}(t), E_{i2}(t), \dots, E_{iK_E}(t)), \quad (3)$$

де K_E – кількість екологічних індикаторів (наприклад, викиди CO_2 , енергоємність, водоспоживання, обсяг відходів тощо).

Сукупність усіх екологічних показників для всієї множини об’єктів та часових моментів можна подати у вигляді тривимірного масиву (тензора):

$$E = \{E_{ijk}\}, i=1, \dots, N; j=1, \dots, K_E; k=1, \dots, T, \quad (4)$$

де $E_{ijk} = E_{ij}(t_k)$.

Аналогічно, для кожного об’єкта o_i та моменту часу t визначається вектор економічних показників

$$C_i(t) = (C_{i1}(t), C_{i2}(t), \dots, C_{iK_C}(t)), \quad (5)$$

де K_C – кількість економічних індикаторів (наприклад, операційні витрати, дохід, рентабельність, капітальні інвестиції, економія ресурсів).

Повний масив економічних даних:

$$C = \{C_{ijk}\}, i=1, \dots, N; j=1, \dots, K_C; k=1, \dots, T. \quad (6)$$

З позицій інформаційних технологій E та C можуть бути реалізовані у вигляді схеми бази даних, де базовими сутностями є:

- Object з атрибутами (ідентифікатор об’єкта, тип, місцезнаходження тощо);
- TimePeriod з атрибутами (ідентифікатор періоду, календарні межі);
- EcoIndicator та EconIndicator, що описують типи показників;
- EcoMeasurement та EconMeasurement, що містять значення E_{ijk} та C_{ijk} , прив’язані до конкретних (o_i, t_k) та типу індикатора.

У концептуальному вигляді інформаційну модель даних можна представити як трійку компонентів, де до вже описаних в (2) множин додається множина I :

$$D = \langle O, T, I \rangle, \quad (7)$$

де $I = I_E \cup I_C$ – множина типів індикаторів, поділена на екологічну I_E та економічну I_C підмножини.

Для кожної пари (o_i, t_k) визначено підмножину вимірів, що відповідає значенням усіх індикаторів для даного об’єкта в даний момент часу:

$$M(o_i, t_k) \subseteq I \times R \quad (8)$$

Щоб інтегрувати екологічні та економічні показники, необхідно ввести оператори обробки даних: нормалізації, агрегування і інтеграції. Оператор нормалізації передбачає введення для кожного індикатора (як екологічного, так і економічного) перетворення вихідного значення показника у нормалізовану величину:

$$\Phi_{norm}: R \rightarrow [0, 1]. \quad (9)$$

Для індикатора X (який може бути як $E_{ij}(t)$, так і $C_{ij}(t)$) типова лінійна нормалізація для реалізації (9) має вигляд:

$$X^* = \Phi_{norm}(X) = \begin{cases} \frac{X^{\max} - X}{X^{\max} - X^{\min}} \\ \frac{X - X^{\min}}{X^{\max} - X^{\min}} \end{cases} \quad (10)$$

де X^{\min} , X^{\max} – мінімальне та максимальне значення індикатора у вибірці (по множині об’єктів та/або часових періодів), а нормалізація передбачає два варіанти розрахунку: для індикаторів типу «чим менше, тим краще» та для індикаторів типу «чим більше, тим краще».

Для кожного вектора $E_i(t)$ та $C_i(t)$ на основі (10) формуються нормалізовані вектори, де всі компоненти належать інтервалу $[0,1]$:

$$\begin{aligned} E_i^*(t) &= (E_{i1}^*(t), E_{i2}^*(t), \dots, E_{iK_E}^*(t)), \\ C_i^*(t) &= (C_{i1}^*(t), C_{i2}^*(t), \dots, C_{iK_C}^*(t)). \end{aligned} \quad (11)$$

Щоб перейти від набору нормалізованих індикаторів до узагальненого показника для кожної підсистеми, вводимо вагові вектори $w_{Ej} \geq 0$, $w_{Cj} \geq 0$, де сума всіх значень кожного з векторів дорівнює 1:

$$w_E = (w_{E1}, \dots, w_{iK_E}), w_C = (w_{C1}, \dots, w_{iK_C}). \quad (12)$$

На основі (11) та (12) агреговані показники екологічної та економічної підсистем для об’єкта o_i у момент часу t задаються як:

$$\begin{aligned} E_{comp,i}(t) &= \Phi_{agg}^E(E_i^*(t), w_E) = \sum_{j=1}^{K_E} w_{Ej} E_{ij}^*(t), \\ C_{comp,i}(t) &= \Phi_{agg}^C(C_i^*(t), w_C) = \sum_{j=1}^{K_C} w_{Cj} C_{ij}^*(t). \end{aligned} \quad (13)$$

Тоді для розрахунку інтегрального індексу сталого розвитку для об’єкта o_i у момент часу t використовується наступний вираз:

$$SRI_i(t) = \alpha \cdot E_{comp,i}(t) + \beta \cdot C_{comp,i}(t), \quad (14)$$

де $\alpha, \beta \geq 0$, $\alpha + \beta = 1$, а значення α та β відображають відносну важливість екологічної та економічної складових. У більш загальному випадку оператор інтеграції (14) можна розширити до нелінійної форми:

$$SRI_i(t) = \Phi_{int}(E_{comp,i}(t), C_{comp,i}(t), \theta), \quad (15)$$

де Φ_{int} – інтегральна функція (наприклад, адитивна, мультиплікативна або функція корисності), а θ – вектор параметрів.

З урахуванням введених понять інтегровану інформаційну модель для всього набору об’єктів та часових моментів можна формально записати наступним чином:

$$M = \{SRI_i(t_k) \mid o_i \in O, t_k \in T\}. \quad (16)$$

Кожне значення $SRI_i(t_k)$ отримано в результаті послідовного застосування операторів нормалізації, агрегування і інтеграції. З позицій ІТ-реалізації ця послідовність відповідає конвеєру обробки даних (data pipeline) (рис. 1).

Екологічна підмодель інтегрованої інформаційної системи сталого розвитку ґрунтується на припущенні, що екологічний стан об’єкта може бути описаний вектором кількісних індикаторів, які відображають ступінь антропогенного навантаження, ресурсної ефективності та відповідності об’єкта екологічним нормативам. Сучасні дослідження наголошують на необхідності математичної уніфікації екологічних індикаторів для можливості їх інтеграції у змішані еколого-економічні моделі [7, 8].

Для кожного об’єкта o_i та моменту часу t_k вводиться вектор екологічних показників, де типовими можуть бути наступні:

- E_{i1} – викиди CO_2 або вуглецевий слід;
- E_{i2} – енергоємність виробництва;
- E_{i3} – споживання води;
- E_{i4} – обсяг відходів;
- E_{i5} – показники якості повітря ($PM_{2.5}$, NO_x);
- E_{i6} – частка відновлюваних ресурсів тощо.

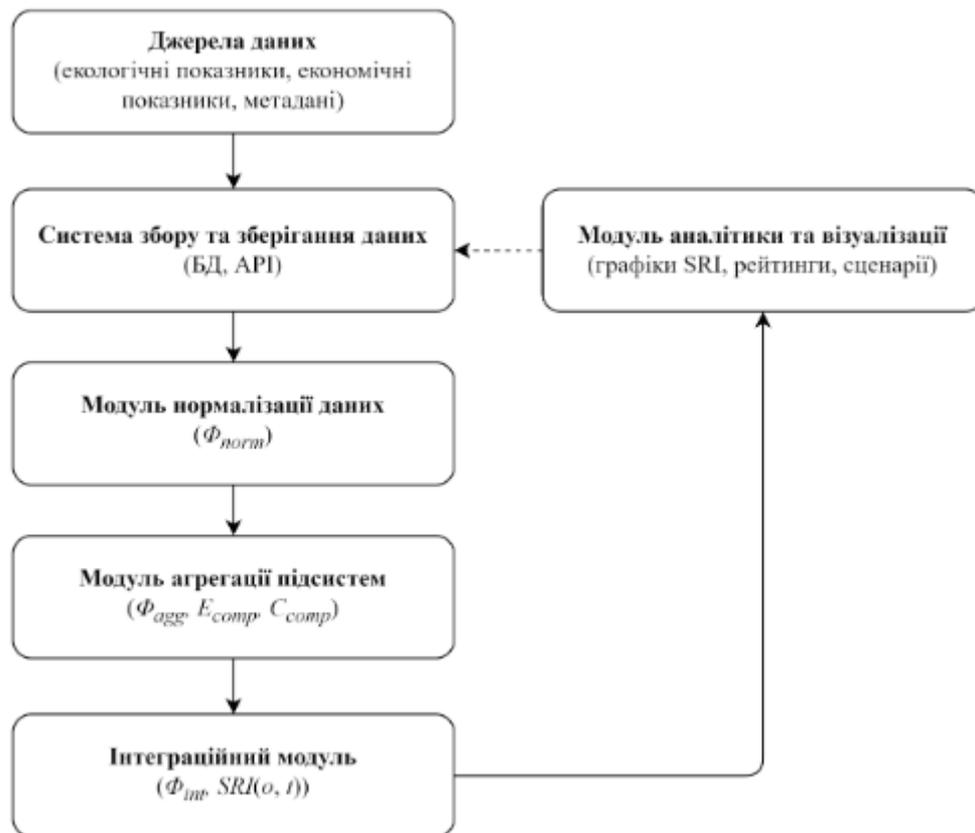


Рис. 1. Інформаційна модель систем сталого розвитку з позицій ІТ-реалізації

Підхід, коли екологічні індикатори трактуються як багатовимірний простір впливів, підтверджено у роботі [7], а усі екологічні показники поділяються на дві групи деструктивні (“the lower, the better”) та ресурсо-підсилюючі (“the higher, the better”).

В той же час економічна підмодель описує здатність об’єкта забезпечувати сталий розвиток шляхом підвищення ефективності використання ресурсів, оптимізації витрат та досягнення економічної стабільності. На відміну від екологічної підмоделі, економічні індикатори відображають результативність управлінських рішень і фінансову стійкість, що підкреслюється у роботі [11].

Мета економічної підмоделі – побудувати агрегований показник економічного стану об’єкта із врахуванням витрат, доходів, інвестицій, рентабельності та ресурсної ефективності.

Тоді для об’єкта o , у момент часу t_k вводяться індикатори для оцінки сталого розвитку [2, 3], які включають:

- C_{11} – загальні витрати (Total Cost, TC);
- C_{12} – операційні витрати (OPEX);
- C_{13} – капітальні інвестиції (CAPEX);
- C_{14} – чистий дохід або виручка;
- C_{15} – рентабельність (ROI, ROA, ROS);
- C_{16} – ресурсна продуктивність (випуск на одиницю енергії/води);
- C_{17} – економія ресурсів (Cost Savings);
- C_{18} – чистий дисконтований дохід (NPV).

Показники поділяються на групи: показники, які бажано мінімізувати (“the lower, the better”), та показники, які бажано максимізувати (“the higher, the better”), що відповідає сучасним аналітичним моделям сталого розвитку [12].

Методика інтеграції на основі формул (3), (5), (11), (13) та (15) передбачає наступні принципи:

- екологічна та економічна підсистеми попередньо агреговані до скалярних величин;
- інтеграція повинна бути інваріантною до масштабу;
- індекс має належати інтервалу $[0,1]$;
- індекс має бути монотонним;
- модель має підтримувати нелінійну інтеграцію, оскільки в більшості досліджень підтверджено неадитивність екологічних та економічних ефектів.

Архітектура ІТ та обчислювальна реалізація інтегрованої моделі

ІТ-реалізація інтегрованої еколого-економічної моделі передбачає побудову програмно-аналітичного комплексу, який згідно рис. 1 забезпечує:

- збір і збереження даних;
- нормалізацію та підготовку індикаторів;
- обчислення агрегованих підсистемних індексів;
- інтеграцію в індекс сталого розвитку (SRI);
- візуалізацію та API-доступ до результатів.

Архітектура системи будується відповідно до моделі багат шарової системи:

- 1) Шар збору даних, призначений для надходження еколого-економічних даних:
 - інтеграція з відкритими екологічними датасетами (CO₂, PM_{2.5}, енергоємність);
 - інтеграція з економічними статистичними сервісами (вартість ресурсів, інвестиції, доходи);
 - API/CSV/XLSX/GeoJSON імпорт;
 - ручне введення даних через веб-інтерфейс.

2) Шар збереження даних, в якому використовується реляційна БД PostgreSQL.

Основні таблиці:

- objects (o_id, type, meta);
- time_periods (t_id, date_from, date_to);
- eco_indicators (e_id, name, direction, threshold);
- econ_indicators (c_id, name, direction, limit);
- eco_measurements (o_id, t_id, e_id, value);
- econ_measurements (o_id, t_id, c_id, value).

3) Шар обробки даних, що реалізовано у вигляді Python-модулів (NumPy та Pandas):

- модуль нормалізації Φ_{norm} ;
- модуль штрафних функцій;
- модуль агрегування підсистем;
- модуль інтеграції Φ_{int} (адитивний, мультиплікативний, експоненціальний, PCA, AHP);
- модуль аналізу чутливості;
- модуль валідації (перевірка монотонності, нормованості індексу)

4) Обчислювальне ядро, що відповідає паралельне обчислення SRI на всій множині $|O| \times |T|$, оптимізацію роботи з великими матрицями індикаторів, векторизацію NumPy, кешування обчислених підсистемних індексів.

5) шар доступу до моделі: REST API (FastAPI / Flask), Web dashboard (Plotly Dash / Streamlit / Grafana), генерація PDF-звітів.

Результати дослідження

Для демонстрації роботи моделі обрано три умовних об’єкти, які характеризують різні типи систем: промисловий об’єкт, муніципальний об’єкт, інфраструктурний об’єкт (аналогічно до дослідження в роботі [8]). Обчислення виконано для одного періоду (t_1), але модель дозволяє масштабування на будь-яку кількість періодів.

Основною метою випробувань було визначення поведінки системи в умовах масштабування кількості вхідних параметрів, збільшення обсягів даних та зростання частоти оновлень. Оцінювання проводилося в контрольованому середовищі, де поступово збільшувалося навантаження від 10 до 10 000 показників на один об’єкт.

Усі вимірювання виконано для трьох ключових компонентів:

- модуля первинної обробки даних (табл. 1);
- модуля інтеграції еколого-економічних параметрів (табл. 2);
- модуля збирання та агрегації показників для аналітичного інтерфейсу (табл. 3).

Випробування дозволили оцінити стабільність роботи, час відгуку системи, використання оперативної пам’яті та пропускну здатність.

Таблиця 1

Навантаження на модуль первинної обробки даних

Кількість показників	Обсяг даних (МБ)	Середній час обробки одного пакета (мс)	Використання CPU (%)	Використання RAM (МБ)
10	0.8	4.1	3–4 %	35
50	4.2	6.8	7–8 %	47
100	8.5	11.2	11–13 %	63
500	41	48.6	22–25 %	132
1 000	82	96.5	31–34 %	210
5 000	410	522	48–52 %	610
10 000	820	1 185	63–68 %	1 120

Таблиця 2

Навантаження на інтеграційний модуль

Кількість показників	Час агрегування (мс)	Середній час генерації одного індексу (мс)	CPU (%)	RAM (МБ)
10	2.5	1.1	2–3 %	18
50	8.7	2.4	5–6 %	26
100	15.3	3.8	9–10 %	41
500	76	14.4	17–19 %	96
1 000	153	27.8	25–28 %	150
5 000	810	139	41–45 %	430
10 000	1 640	295	58–61 %	770

Таблиця 3

Сумарне навантаження системи при масштабуванні

Кількість показників	Сумарний час обробки (мс)	Загальне використання CPU (%)	Споживання RAM (МБ)	Кількість операцій за секунду
10	6.9	6 %	53	950
50	15.5	12 %	70	720
100	27.3	20 %	104	540
500	125	38 %	260	170
1 000	250	54 %	360	82
5 000	1 332	70 %	1 040	21
10 000	2 825	88 %	1 900	8

Отримані результати вказують на лінійно-квазілінійну залежність часу обробки від кількості вхідних показників. Модуль первинної обробки даних демонструє стабільний ріст навантаження без різких піків, що характеризує його як обчислювально передбачуваний. Інтеграційний модуль виявив дещо вищу чутливість до масштабування, особливо після перевищення межі у 5 000 показників, що супроводжується зростанням використання оперативної пам'яті та збільшенням часу формування агрегованих індексів.

При великих масивах даних система зберігає працездатність, хоча кількість операцій, які можуть бути виконані за секунду, зменшується приблизно у двадцять разів при переході від 100 до 10 000 показників. Незважаючи на це, експерименти підтвердили, що модель не демонструє деградації продуктивності чи нестачі ресурсів, а навантаження зростає прогнозовано. Це свідчить про придатність архітектури для подальшої оптимізації та можливість горизонтального масштабування у високонавантажених сценаріях.

Отримані результати демонструють, що запропонована інтегрована ІТ-модель стабільно функціонує за умов значного збільшення кількості еколого-економічних показників. Під час тестування спостерігалось поступове та передбачуване зростання часу обробки, що узгоджується з загальними закономірностями масштабування аналітичних інформаційних систем, описаними в [1, 4, 7]. Важливо, що навіть при максимальному навантаженні модель не виявила ознак деградації продуктивності або критичних помилок, що свідчить про коректність побудованої архітектури та її придатність для роботи з багатовимірними науковими та управлінськими даними.

Порівняння експериментальних показників із результатами попередніх досліджень підтверджує, що інтеграційний модуль є найбільш чутливим до масштабування, адже саме на цьому етапі відбувається агрегування великої кількості параметрів. Подібні тенденції фіксуються у роботах [7, 8, 11], присвячених екологічно орієнтованим цифровим платформам та агентно-орієнтованим моделям, де зростання кількості змінних безпосередньо впливає на споживання ресурсів та пропускну здатність системи. Водночас модуль первинної обробки продемонстрував більш рівномірний розподіл навантаження, що характеризує його як оптимізований для потокових операцій.

Лінійно-квазілінійна залежність часу обробки та споживання пам'яті дозволяє масштабувати систему без необхідності кардинальних змін в архітектурі, а запропонована модель підтверджує свою здатність працювати в умовах зростаючих обсягів даних, що відображає реальні вимоги цифрових інфраструктур сталого розвитку.

Разом з тим, результати тестування вказують на наявність зон для оптимізації, зокрема на рівні агрегування та інтеграції показників. Підвищене споживання пам'яті при великих масивах даних свідчить про доцільність застосування методів кешування, паралельної обробки та розподілених обчислень. Також залишаються перспективними напрямками інтеграція адаптивних вагових коефіцієнтів та алгоритмів автоматичної детекції аномалій, що дозволить підвищити точність і стійкість моделі. Обмеженням дослідження є те, що експерименти проводилися у статичних умовах на синтетичних масивах даних; для повної валідації моделі необхідні тестування на реальних потоках та в середовищах із непередбачуваними змінами параметрів.

Висновки

У роботі розроблено інтегровану інформаційну модель управління сталим розвитком, яка поєднує екологічні та економічні показники в єдиному цифровому аналітичному контурі. На основі узагальнення сучасних досліджень розроблено формальний апарат моделі, що включає структуру множин об'єктів та часових періодів, оператори нормалізації, агрегування та інтеграції, а також математичне визначення інтегрального індексу сталого розвитку SRI. Запропонована архітектура ІТ-системи реалізує функції збору, зберігання, аналізу й обробки еколого-економічних даних та підтримує розрахунок складних багатовимірних показників.

Експериментальна частина підтвердила працездатність моделі в умовах масштабування кількості показників від 10 до 10 000. Результати тестування продемонстрували лінійно-квазілінійний характер зростання навантаження, відсутність деградації продуктивності та передбачувану поведінку системи під час інтенсивних операцій з великими матрицями даних. Збільшення часу агрегування та зростання використання пам'яті при великих вибірках узгоджуються з результатами сучасних досліджень цифрових зелених платформ та підтверджують коректність методології моделювання.

Практична цінність моделі полягає в можливості її застосування в промисловості, енергетиці, інфраструктурному плануванні, а також у регіональних системах екологічного моніторингу та системах підтримки прийняття рішень. Запропонована архітектура може бути розширена для потокової обробки даних, включення методів машинного навчання, інтеграції з геоінформаційними системами й впровадження мікросервісної декомпозиції. Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення механізмів оптимізації обчислень, включення адаптивних вагових моделей та розробку інтелектуальних фільтрів аномалій для підвищення точності індексу сталого розвитку.

Список використаної літератури

1. Böttcher T. P., Empelmann S., Weking J., Hein A., Krcmar H. Digital sustainable business models: Using digital technology to integrate ecological sustainability into the core of business models. *Information Systems Journal*. 2024. Vol. 34, No. 3. P. 736–761. DOI: 10.1111/isj.12436
2. George G., Merrill R. K., Schillebeeckx S. J. D. Digital sustainability and entrepreneurship: How digital innovations are helping tackle climate change and sustainable development. *Entrepreneurship Theory and Practice*. 2020. Vol. 45, No. 5. P. 999–1027. DOI: 10.1177/1042258719899425
3. Hariram N. P., Mekha K. B., Suganthan V., Sudhakar K. Sustainalism: An integrated socio-economic-environmental model to address sustainable development and sustainability. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 13. 10682. DOI: 10.3390/su151310682
4. Sharma P., Srivastava A., Bao C. Information systems-driven multi-disciplinary approaches to sustainability and circular economy. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2025. Vol. 52. 101007. DOI: 10.1016/j.cogsc.2025.101007
5. Zhang J., Liu M. How to leverage digital sustainability orientation to promote environmentally sustainable practices of manufacturing enterprises in China. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 12. 5112. DOI: 10.3390/su16125112
6. Al-Debei M. M., Avison D. Developing a unified framework of the business model concept. *European Journal of Information Systems*. 2010. Vol. 19, No. 3. P. 359–376. DOI: 10.1057/ejis.2010.21
7. Geisendorf S., Klippert C. Integrated sustainability policy assessment – an agent-based ecological-economic model. *Journal of Evolutionary Economics*. 2022. Vol. 32. P. 1017–1048. DOI: 10.1007/s00191-021-00749-0
8. Zhao A., Wang J., Sun Z., Guan H. Research on the evolutionary path of eco-conservation and high-quality development in the Yellow River Basin based on an agent-based model. *Systems*. 2022. Vol. 10, No. 4. 105. DOI: 10.3390/systems10040105
9. Cengiz O., Baktemur F. İdil, Canoglu M. Estimating the role of economic globalization, technological development and household consumption on ecological footprint in Visegrad countries. *Problemy Ekorozwoju*. 2025. Vol. 20, No. 1. P. 143–158. DOI: 10.35784/preko.6609
10. Yu Z., Guo X. D. Integration of ecological innovation, institutional governance, and human capital development for a sustainable environment in Asian Countries. *Economic Research – Ekonomska Istraživanja*. 2023. Vol. 36, No. 3. DOI: 10.1080/1331677X.2022.2155681
11. Xu G., Zhang J., Wang S. How digitalization and sustainability promote digital green innovation for Industry 5.0 through capability reconfiguration: Strategically oriented insights. *Systems*. 2024. Vol. 12, No. 9. 341. DOI: 10.3390/systems12090341
12. Khan A., Ximei W. Digital economy and environmental sustainability: Do information communication and technology (ICT) and economic complexity matter? *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, No. 19. 12301. DOI: 10.3390/ijerph191912301
13. Ghazawneh A., Henfridsson O. Balancing platform control and external contribution in third-party development: The boundary resources model. *Information Systems Journal*. 2013. Vol. 23, No. 2. P. 173–192. DOI: 10.1111/j.1365-2575.201

14. Adam M., Croitor E., Werner D., Benlian A., Wiener M. Input control and its signalling effects for complementors' intention to join digital platforms. *Information Systems Journal*. 2023. Vol. 33, No. 3. P. 437–466. DOI: 10.1111/isj.12408
15. Mohammadi N., Soltanifar E. Mapping the knowledge domain and emerging trends of sustainable startups. *Discover Sustainability*. 2025. Vol. 6. 1044. DOI: 10.1007/s43621-025-01949

References

1. Böttcher, T. P., Empelmann, S., Weking, J., Hein, A., & Krcmar, H. (2024). Digital sustainable business models: Using digital technology to integrate ecological sustainability into the core of business models. *Information Systems Journal*, 34(3), 736–761. <https://doi.org/10.1111/isj.12436>
2. George, G., Merrill, R. K., & Schillebeeckx, S. J. D. (2020). Digital sustainability and entrepreneurship: How digital innovations are helping tackle climate change and sustainable development. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 45(5), 999–1027. <https://doi.org/10.1177/1042258719899425>
3. Hariram, N. P., Mekha, K. B., Suganthan, V., & Sudhakar, K. (2023). Sustainalism: An integrated socio-economic-environmental model to address sustainable development and sustainability. *Sustainability*, 15(13), 10682. <https://doi.org/10.3390/su151310682>
4. Sharma, P., Srivastava, A., & Bao, C. (2025). Information systems-driven multi-disciplinary approaches to sustainability and circular economy. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 52, 101007. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101007>
5. Zhang, J., & Liu, M. (2024). How to leverage digital sustainability orientation to promote environmentally sustainable practices of manufacturing enterprises in China. *Sustainability*, 16(12), 5112. <https://doi.org/10.3390/su16125112>
6. Al-Debei, M. M., & Avison, D. (2010). Developing a unified framework of the business model concept. *European Journal of Information Systems*, 19(3), 359–376. <https://doi.org/10.1057/ejis.2010.21>
7. Geisendorf, S., & Klippert, C. (2022). Integrated sustainability policy assessment – an agent-based ecological-economic model. *Journal of Evolutionary Economics*, 32, 1017–1048. <https://doi.org/10.1007/s00191-021-00749-0>
8. Zhao, A., Wang, J., Sun, Z., & Guan, H. (2022). Research on the evolutionary path of eco-conservation and high-quality development in the Yellow River Basin based on an agent-based model. *Systems*, 10(4), 105. <https://doi.org/10.3390/systems10040105>
9. Cengiz, O., Baktemur, F. İdil, & Canoglu, M. (2025). Estimating the role of economic globalization, technological development and household consumption on ecological footprint in Visegrad countries. *Problemy Ekorozwoju*, 20(1), 143–158. <https://doi.org/10.35784/preko.6609>
10. Yu, Z., & Guo, X. D. (2023). Integration of ecological innovation, institutional governance, and human capital development for a sustainable environment in Asian Countries. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 36(3). <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2155681>
11. Xu, G., Zhang, J., & Wang, S. (2024). How digitalization and sustainability promote digital green innovation for Industry 5.0 through capability reconfiguration: Strategically oriented insights. *Systems*, 12(9), 341. <https://doi.org/10.3390/systems12090341>
12. Khan, A., & Ximei, W. (2022). Digital economy and environmental sustainability: Do information communication and technology (ICT) and economic complexity matter? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12301. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912301>
13. Ghazawneh, A., & Henfridsson, O. (2013). Balancing platform control and external contribution in third-party development: The boundary resources model. *Information Systems Journal*, 23(2), 173–192. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2575.201>
14. Adam, M., Croitor, E., Werner, D., Benlian, A., & Wiener, M. (2023). Input control and its signalling effects for complementors' intention to join digital platforms. *Information Systems Journal*, 33(3), 437–466. <https://doi.org/10.1111/isj.12408>
15. Mohammadi, N., & Soltanifar, E. (2025). Mapping the knowledge domain and emerging trends of sustainable startups. *Discover Sustainability*, 6, 1044. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01949>

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025