

А. М. ТРИГУБА, І. Л. ТРИГУБА, І. Р. ФІРМАН, В. Ю. ФАМУЛЯК, Н. Я. КОВАЛЬ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ У ЦИРКУЛЯРНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ОРГАНІЧНИМИ ВІДХОДАМИ

Обґрунтовано доцільність створення інтелектуальної системи прогнозування та інтегральної оцінки екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами, орієнтованої на муніципальний рівень управління. Запропонований підхід до створення інтелектуальної системи базується на інтеграції багаторівневих потоків даних із сенсорних мереж, геоінформаційних систем, реєстрів, інформаційних платформ органів місцевого самоврядування та комунальних підприємств у єдиний аналітико-прогнозний контур. Розроблено структурно-функціональну модель інтелектуальної системи у вигляді багаторівневої архітектури, що поєднує модулі збору та агрегації даних, аналітико-інтеграційний рівень, прогнозно-модельний блок, модуль оцінки екологічних ризиків і систему підтримки прийняття рішень, з механізмами зворотного зв'язку, адаптації та навчання. Запропоновано структурно-логічну модель інтегральної оцінки екологічних ризиків, яка формалізує процес прогнозування негативних подій на основі імовірнісної оцінки їх настання та кількісного аналізу потенційних екологічних наслідків. Запропоновано інтегральний індекс ризику як узагальнений показник багатofакторної природи екологічної безпеки, що забезпечує уніфіковану шкалу оцінювання, класифікацію ризикових станів та їх трансформацію у формалізовані управлінські рішення. Реалізовано ризик-орієнтовану логіку категоризації небезпек із формуванням сценаріїв реагування та адаптивного управління. Отримані результати формують цілісну методологічну основу для побудови інтелектуальних інформаційних систем екологічної безпеки в умовах циркулярної економіки та цифрового врядування. Запропоновані моделі забезпечують системну інтеграцію прогнозування, аналітики, оцінки ризиків і підтримки прийняття рішень, створюючи передумови для впровадження ризик-орієнтованих стратегій управління органічними відходами на рівні територіальних громад, підвищення екологічної стійкості муніципальних систем і науково обґрунтованої цифрової трансформації процесів екологічного управління.

Ключові слова: інтелектуальна система; екологічні ризики; циркулярні системи; органічні відходи; прогнозування ризиків; інтегральна оцінка; підтримка прийняття рішень; муніципальне управління; цифрове врядування.

A. TRYHUBA, I. TRYHUBA, I. FIRMAN, V. FAMULIAK, N. KOVAL

INTELLIGENT FORECASTING OF ENVIRONMENTAL RISKS IN CIRCULAR ORGANIC WASTE MANAGEMENT SYSTEMS

An intelligent system for forecasting and integrated assessment of environmental risks in circular organic waste management systems is developed with a focus on the municipal governance level. The proposed approach is based on the integration of multi-source data flows from sensor networks, geographic information systems, public registries, municipal information platforms, and utility services into a unified analytical and predictive framework. A structural-functional model of the intelligent system is constructed as a multi-layer architecture that combines data acquisition and aggregation modules, an analytical-integration layer, a predictive modeling block, an environmental risk assessment module, and a decision support system, complemented by feedback, adaptation, and learning mechanisms. A structural-logical model for the integrated assessment of environmental risks is developed to formalize the forecasting of hazardous events by combining probabilistic estimation of event occurrence with quantitative evaluation of potential environmental impacts. An integral risk index is proposed as a unified multi-factor indicator of environmental hazard, enabling standardized risk measurement, classification of risk states, and their transformation into formalized management decisions. A risk-oriented categorization logic is implemented to support scenario-based response strategies and adaptive management processes. The obtained results establish a coherent methodological foundation for building intelligent environmental safety systems within the framework of circular economy and digital governance. The proposed models provide systemic integration of forecasting, analytics, risk assessment, and decision support, forming a unified management contour for organic waste systems. This creates practical preconditions for the implementation of risk-oriented management strategies at the community level, strengthening the ecological resilience of municipal infrastructures and supporting scientifically grounded digital transformation of environmental governance processes.

Keywords: intelligent system; environmental risks; circular systems; organic waste management; risk forecasting; integrated risk assessment; decision support systems; municipal governance; digital environmental management.

Вступ. Сучасні трансформаційні процеси у сфері управління відходами відбуваються в умовах одночасного посилення екологічних викликів, цифровізації управлінських процесів та переорієнтації економічних систем на принципи циркулярної економіки [1]. Органічні відходи, які становлять значну частку у структурі побутових та агропромислових відходів, поступово трансформуються з категорії екологічної проблеми у стратегічний ресурс розвитку територій. Водночас саме органічна фракція формує найбільші екологічні загрози, пов'язані з викидами метану, забрудненням ґрунтів і водних ресурсів, деградацією екосистем та зростанням соціально-екологічної напруженості в громадах.

У межах циркулярної парадигми основним

завданням стає не лише організація збору, переробки та повторного використання відходів, а й прогнозування екологічних ризиків як основи превентивного управління негативними наслідками. Традиційні підходи до екологічного моніторингу, що базуються переважно на ретроспективному аналізі статистичних даних, є недостатніми в умовах динамічних змін, просторової неоднорідності територій та зростання складності соціо-еколого-економічних систем. Це зумовлює потребу переходу до інтелектуальних інформаційних технологій, орієнтованих на прогнозування, моделювання сценаріїв розвитку та підтримку управлінських рішень.

Особливої актуальності набуває задача прогнозування екологічних ризиків на

муніципальному рівні, де управлінські рішення щодо органічних відходів безпосередньо впливають на якість життя населення, екологічну безпеку та стійкість територіальних громад [2]. За цих умов управління відходами трансформується з інфраструктурної функції у складову стратегічного управління розвитком територій, що вимагає інтеграції екологічних, економічних, соціальних і цифрових компонентів у єдину систему прийняття рішень. Створення інтелектуальних інформаційних систем прогнозування екологічних ризиків забезпечує науково-методологічну основу для переходу від реактивних моделей реагування до проактивного управління ризиками в циркулярних системах управління органічними відходами.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка інтелектуальної інформаційної технології прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами, орієнтованої на підтримку управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та сталого розвитку територій. Запропонована інформаційна технологія спрямована на формування цифрового інструментарію, здатного забезпечувати проактивне управління екологічними загрозами на основі прогнозних моделей і аналітики даних у межах циркулярної економіки.

Для досягнення поставленої мети у роботі слід вирішити такі основні наукові задачі:

- розробити структурно-функціональну модель інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами на основі інтеграції даних, аналітичних і прогнозних модулів;
- побудувати структурно-логічну модель інтегральної оцінки екологічних ризиків, що враховує імовірність настання негативних подій та потенційні екологічні наслідки в системах поведінки з органічними відходами.

Таким чином, поставлені задачі забезпечують цілісну наукову логіку дослідження, що поєднує технологічний, модельний та управлінський рівні формування інтелектуальної інформаційної технології прогнозування екологічних ризиків.

Аналіз використаних літературних джерел. На основі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що науковці зосереджували свою увагу на окремих наукових напрямках, що частково формують теоретичну та методологічну основу інтелектуальних інформаційних технологій прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами. Роботи [3, 4] формують концептуальну базу циркулярної економіки та сталого управління ресурсами, у межах яких органічні відходи розглядаються не лише як екологічна проблема, а як елемент замкнених матеріально-енергетичних циклів розвитку територій. У дослідженнях [5] розкрито підходи до цифровізації

систем управління відходами та застосування інтелектуальних інформаційних платформ у муніципальному управлінні, що створює підґрунтя для інтеграції прогнозних моделей у практику прийняття управлінських рішень.

Заслугує на увагу наукова праця [6], у якій розглянуто методи моделювання екологічних ризиків та формалізовані підходи до оцінювання імовірності настання негативних екологічних подій. Ці дослідження закладають методологічні основи ризик-орієнтованого управління та дозволяють перейти від описового аналізу екологічної ситуації до кількісного прогнозування ризиків. Робота [7] присвячена застосуванню методів штучного інтелекту та аналізу даних у сфері екологічного моніторингу і управління відходами, що підтверджує ефективність інтелектуальних моделей у задачах прогнозування складних екосистемних процесів.

Дослідження [8, 9] формують наукову основу для побудови систем підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки та управління територіальним розвитком, де інтегруються прогностичні моделі, аналітичні інструменти та сценарне планування. У праці [10] розглянуто структури цифрових платформ управління ресурсами, що дозволяє інтерпретувати інтелектуальні інформаційні технології як складні кіберфізичні системи, орієнтовані на підтримку стратегічного управління.

Окремі дослідження [11, 12] присвячені управлінню екологічними ризиками у напрямі сталого розвитку та кліматичних викликів. У них автори підкреслюють потребу інтеграції прогнозних моделей у системи територіального управління. Роботи [13–15], що містять авторські підходи до інтелектуального управління інфраструктурними, екологічними та ресурсними системами, підтверджують доцільність використання інтелектуальних інформаційних технологій як базису для формування цифрових систем управління нового покоління.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить, що наявні наукові підходи охоплюють окремі аспекти циркулярної економіки, управління органічними відходами, моделювання екологічних ризиків та цифровізації управлінських процесів. Водночас відсутні комплексні інтелектуальні інформаційні технології, які інтегрують процеси прогнозування екологічних ризиків, аналітику даних і механізми підтримки прийняття рішень у межах єдиної циркулярної системи управління органічними відходами. Це зумовлює наукову актуальність і практичну значущість розроблення інтелектуальної інформаційної технології прогнозування екологічних ризиків як інструменту стратегічного управління розвитком територій у напрямі циркулярної економіки.

Структурно-функціональна модель прогнозування екологічних ризиків. Структура інтелектуальної інформаційної системи прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах

управління органічними відходами формується як багаторівнева інтегрована система. Вона поєднує процеси збору даних, аналітичної обробки, прогнозного моделювання та підтримки прийняття управлінських рішень у єдиному цифровому середовищі. Її побудова ґрунтується на принципі функціональної ієрархії, де кожен рівень виконує окрему логічну функцію, але водночас є частиною цілісної інформаційної екосистеми.

Базовий рівень забезпечує інтеграцію структурованих і неструктурованих даних у єдине інформаційне середовище, що створює основу для подальшої аналітичної обробки отриманих даних. Формально потік даних представляється у вигляді множини:

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}, \quad (1)$$

де d_i – окремі інформаційні потоки (сенсорні, просторові, статистичні, адміністративні тощо), що характеризують процеси утворення, накопичення, переробки та утилізації органічних відходів.

Наступний рівень інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків відображає аналітико-інтеграційний модуль, який забезпечує попередню обробку даних, фільтрацію шумів, нормалізацію показників та просторово-часову

синхронізацію інформаційних потоків. Саме на цьому рівні відбувається формування єдиного інформаційного простору, у якому дані з різних джерел набувають узгодженого формату та семантичної цілісності. Аналітична трансформація даних подається у вигляді виразу:

$$T : D \rightarrow X, \quad (2)$$

де $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ – множина ознак, що використовуються у прогнозних моделях екологічних ризиків.

Основним елементом інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків є прогнозно-модельний рівень. Прогнозний компонент формує оцінку ризику як функцію від вхідних ознак:

$$R_{env}(t) = f(X(t), \Theta), \quad (3)$$

де $R_{env}(t)$ – прогнозне значення екологічного ризику у t -й момент часу; $X(t)$ – вектор ознак; Θ – параметри інтелектуальної моделі.

Запропонований підхід (3) дозволяє реалізувати адаптивне прогнозування, чутливе до змін у середовищі функціонування циркулярної системи управління органічними відходами (рис. 1).

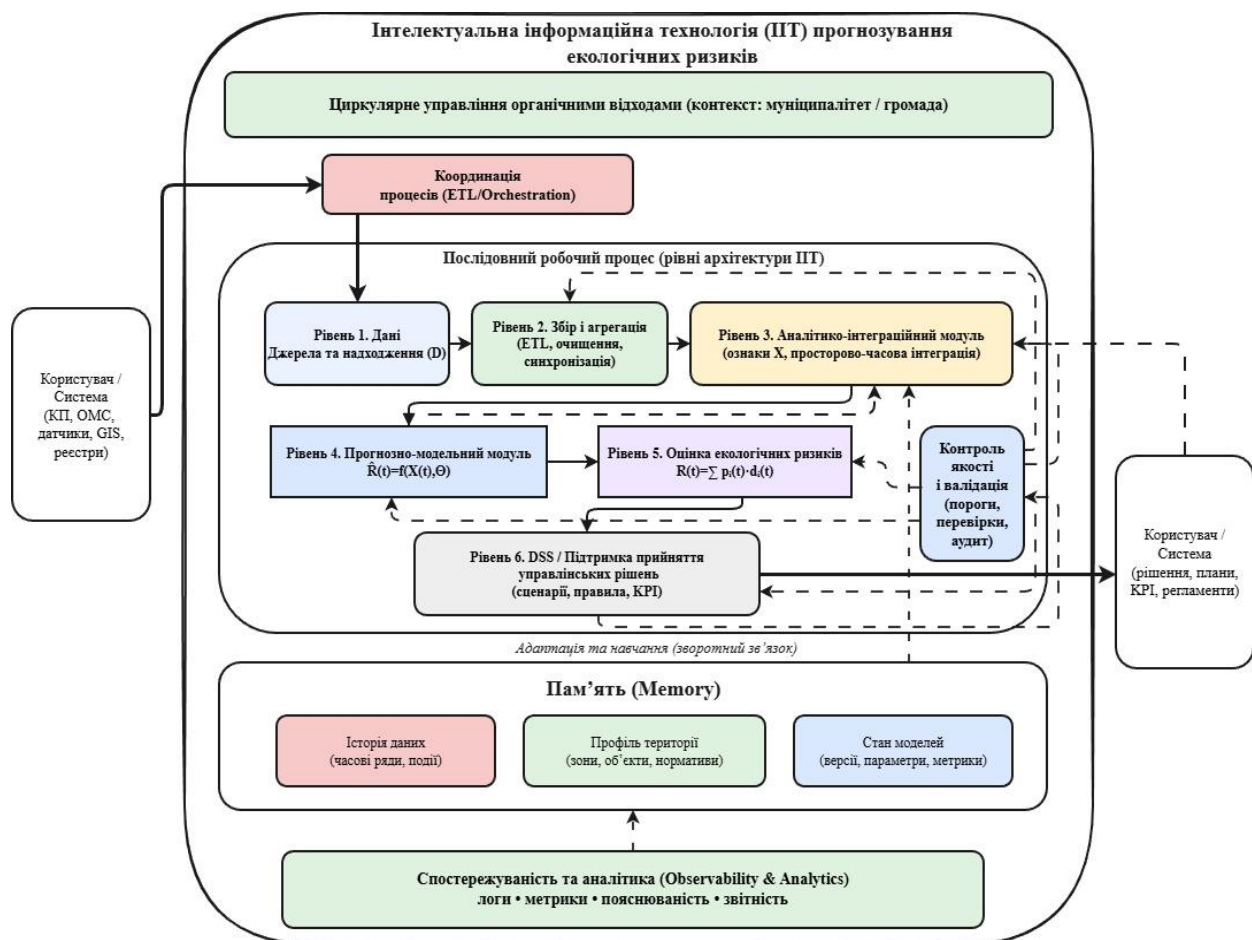


Рис. 1. Структурно-функціональна модель інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами

Над прогнозним рівнем формується рівень підтримки прийняття управлінських рішень, який забезпечує інтерпретацію результатів прогнозування, формування сценаріїв розвитку ситуації та вибір оптимальних стратегій управління.

Структура інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків дозволяє реалізувати принцип модульності, що забезпечує масштабованість та адаптивність інформаційної технології до змін умов функціонування системи. Це створює можливість поступового розширення функціональності без порушення цілісності системи.

Таблиця 1 – Функціональні рівні інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків

Рівень системи	Функціональне призначення
Збір даних	Агрегація сенсорних, просторових, статистичних та адміністративних даних
Аналітична інтеграція	Нормалізація, фільтрація, синхронізація, формування ознак
Прогнозне моделювання	Побудова моделей прогнозування екологічних ризиків
Оцінка ризиків	Формування інтегральних показників ризику
Підтримка рішень	Генерація сценаріїв та управлінських рекомендацій

Інтеграція аналітичних і прогнозних модулів у єдину інтелектуальну систему дозволяє реалізувати принцип проактивного управління, за якого система не лише фіксує наявні екологічні проблеми, а й формує прогнозні сценарії їх розвитку. Такий підхід принципово відрізняється від традиційних моделей управління відходами, що мають реактивний характер і орієнтовані переважно на ліквідацію наслідків негативних екологічних процесів.

Для прогнозно-модельного рівня реалізовано ансамбль моделей, що забезпечують відтворюване прогнозування екологічних ризиків залежно від типу події та структури даних. Для задач бінарного прогнозу настання інцидентів (витік фільтрату, перевищення запахового навантаження, збій біопроектів тощо) використано логістичну регресію, градієнтний бустинг XGBoost та рекурентні нейронні мережі типу LSTM для урахування часових залежностей. Для задач оцінювання інтенсивності подій використано моделі аналізу виживання (Cox proportional hazards) і пуассонівську регресію.

Навчання моделей проводилося на даних моніторингу системи управління органічними відходами Львівської міської територіальної громади, зокрема з використанням звітів ЛКП «Зелене місто» (м. Львів), даних автоматизованого обліку контейнерних майданчиків, журналів звернень громадян щодо запахового навантаження, а також метеорологічних даних Львівського регіонального центру з гідрометеорології. Навчання моделей здійснювалося за принципом ковзного вікна з часовою крос-валідацією. Вхідний вектор ознак включав технологічні параметри об'єктів переробки,

метеорологічні фактори, логістичні показники та просторові характеристики локацій. Для усунення мультиколінеарності застосовано відбір ознак за критеріями інформаційної значущості (SHAP, mutual information).

Якість прогнозів оцінювалася за метриками AUC-ROC, Brier score, precision-recall, а також за калібрувальними кривими. Порівняння моделей показало, що для коротких горизонтів (до 24 год) найкращі результати дає XGBoost, тоді як для довших горизонтів (48...96 год) перевагу має LSTM за рахунок урахування сезонності та інерційності біопроектів. Середня абсолютна помилка оцінки інтенсивності подій становила 6,8%, що є прийнятним для задач превентивного управління. Отримані показники підтверджують придатність моделей для використання у інтелектуальній системі прогнозування екологічних ризиків.

Запропонована структура інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків забезпечує основу для побудови цифрових платформ управління органічними відходами нового покоління. У них екологічні ризики розглядаються не як побічний ефект функціонування системи, а як основний об'єкт прогнозного та стратегічного управління в межах циркулярної економіки. Вона забезпечує логічну інтеграцію даних, моделей і управлінських механізмів у єдину інформаційно-аналітичну екосистему, що підвищує якість управлінських рішень і рівень екологічної безпеки територій.

Структурно-логічна модель інтегральної оцінки екологічних ризиків. Формалізовану модель прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами будовано як поєднання двох взаємопов'язаних контурів (рис. 2). Перший контур відповідає за прогноз імовірності настання небажаних подій у часовому горизонті τ з урахуванням поточного стану системи та зовнішніх чинників. Другий контур виконує оцінювання потенційних екологічних наслідків цих подій, агрегує їх у стандартизовані показники та формує інтегральний індекс ризику $R(t, \tau)$, який використовується у системі підтримки прийняття рішень. тощо).

Формалізація подій, стану та факторів

Нехай циркулярна система поводження з органічними відходами в t -й момент часу описується вектором контрольованих змінних:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}. \quad (4)$$

Складові виразу (4) включають технологічні параметри (температура компостування, вологість, час витримки, навантаження на ємності), організаційні та логістичні показники (частота вивезення, наповнення контейнерів, просторові маршрути), а також метеорологічні та сезонні фактори. Множину потенційно небажаних подій позначимо

$E = \{E_1, \dots, E_n\}$, де типові події включають витік фільтрату, перевищення запахового навантаження, збій аерації, некоректне сортування з домішками, перегрів/переохолодження біопроецу, несанкціоноване накопичення відходів у точках збору.

Для кожної події E_i вводиться прогнозована імовірність на горизонті τ :

$$p_i(t, \tau) = \mathbb{P}(E_i \text{ станеться на } [t, t + \tau] | X(t), H), \quad (5)$$

де H – історичні дані спостережень та інцидентів, що використовується для навчання і калібрування.

Прогнозування імовірностей настання подій

У практичних реалізаціях $p_i(t, \tau)$ слід представити як бінарну ймовірність (класифікаційний підхід), або як інтенсивність (hazard) з подальшим перерахунком у ймовірність (підхід аналізу виживання).

Для класифікаційного підходу базова формула має вигляд:

$$p_i(t, \tau) = \sigma(\beta_i^\top z(t, \tau)), \quad (6)$$

де $\sigma(\cdot)$ – логістична функція; $z(t, \tau)$ – вектор ознак (у тому числі лаги та ковзні статистики); β_i^\top – параметри моделі.

Для прогнозування подій, що істотно залежать від накопичення та часу експозиції пропонується використовувати функцію ризику $\lambda_i(t)$ та функцію виживання:

$$p_i(t, \tau) = 1 - \exp\left(-\int_t^{t+\tau} \lambda_i(u) du\right), \quad (7)$$

Моделлю передбачається, що вибір конкретного прогнозного ядра не є жорстко фіксованим. Це пов'язано із тим, що у прикладних задачах достатньо забезпечити відтворену процедуру навчання, регулярне оновлення та контроль якості прогнозу через метрики калібрування (Brier score) і дискримінації (AUC) з урахуванням дисбалансу класів інцидентів.

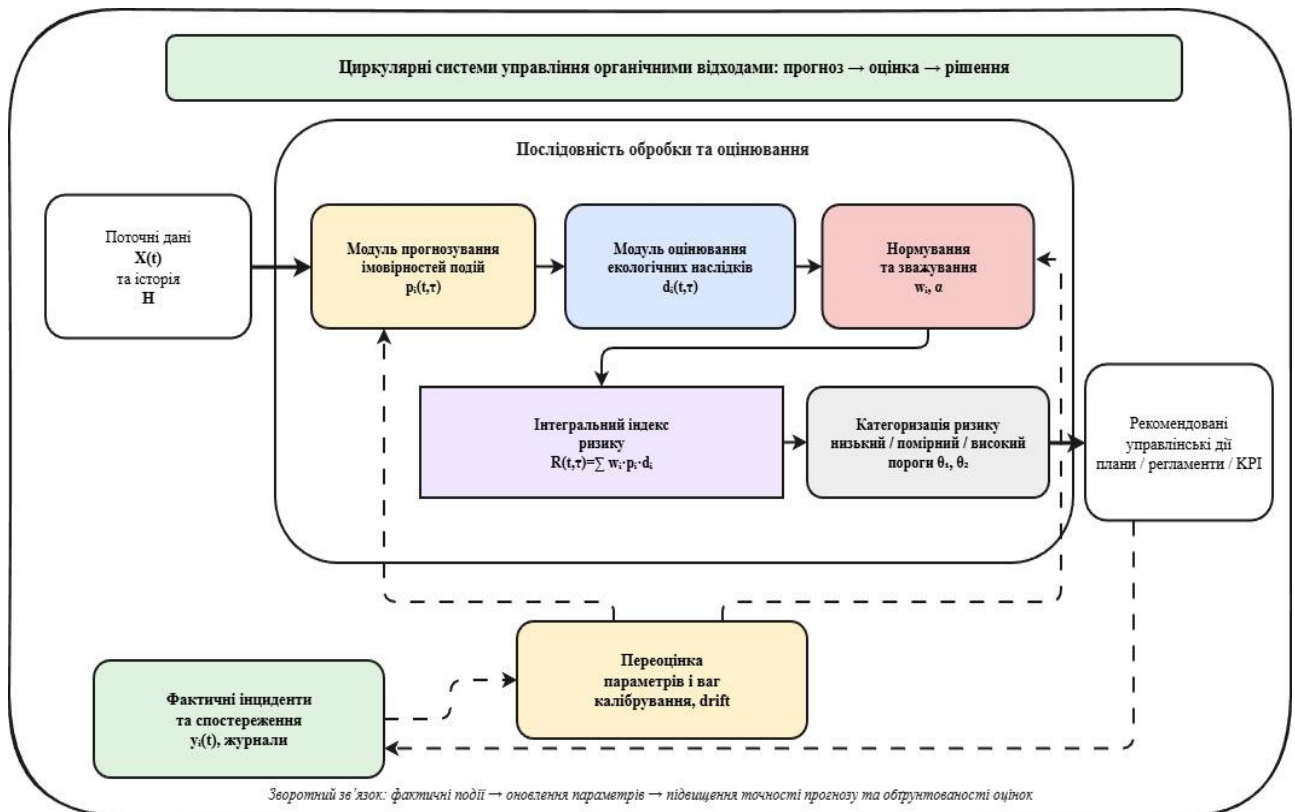


Рис. 2. Структурно-логічна модель інтегральної оцінки екологічних ризиків

Оцінювання екологічних наслідків

Екологічні наслідки подій доцільно подати як функцію завданої шкоди $d_i(t, \tau)$, яка відображає очікуваний негативний вплив на компоненти довкілля та населення громад.

У типових випадках наслідки є багатовимірними, тому вводиться вектор компонент завданої шкоди:

$$c_i(t, \tau) = (c_i^{(w)}(t, \tau), c_i^{(a)}(t, \tau), c_i^{(s)}(t, \tau), c_i^{(h)}(t, \tau)), \quad (8)$$

де w, a, s, h – відповідно індекси, що відповідають завданій шкоді воді, повітрю, ґрунтам та санітарно-гігієнічним аспектам.

Для отримання скалярної оцінки наслідків завданої шкоди застосовується зважене агрегування з нормуванням компонент:

$$d_i(t, \tau) = \sum_{k \in \{w, a, s, h\}} \alpha_k \tilde{c}_i^{(k)}(t, \tau), \quad \sum_k \alpha_k = 1, \alpha_k \geq 0. \quad (9)$$

Нормовані компоненти $\tilde{c}_i^{(k)}$ визначають на основі відношення до допустимих (цільових) значень або через шкалу 0–1:

$$\tilde{c}_i^{(k)}(t, \tau) = \min \left(1, \frac{c_i^{(k)}(t, \tau)}{c_{i,ref}^{(k)}} \right), \quad (10)$$

де $c_{i,ref}^{(k)}$ – референтний рівень (норматив, технологічний ліміт або погоджений «пороговий» рівень для громади).

Інтегральна оцінка ризику та категоризація

Інтегральний ризик системи на горизонті τ визначаємо як зважену суму добутків «імовірність × наслідки»:

$$R(t, \tau) = \sum_{i=1}^n w_i p_i(t, \tau) d_i(t, \tau), \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0. \quad (11)$$

Коефіцієнти w_i відображають пріоритетність типів подій з позиції муніципальної політики, ресурсних обмежень та екологічної чутливості території. Для переходу від числового $R(t, \tau)$ до управлінських рішень вводяться порогові рівні:

$$RiskClass(t, \tau) = \begin{cases} \text{низький}, & R(t, \tau) < \theta_1, \\ \text{помірний}, & \theta_1 \leq R(t, \tau) < \theta_2, \\ \text{високий}, & R(t, \tau) \geq \theta_2, \end{cases} \quad (12)$$

де $R(t, \tau)$ – інтегральний індекс екологічного ризику у t-й момент часу для горизонту прогнозування τ ;

θ_1, θ_2 – порогові значення (критерії класифікації), що задаються на основі нормативних екологічних стандартів, експертних оцінок та процедур адаптивного калібрування моделі.

Для територій з неоднорідною чутливістю (водоохоронні зони, наближеність до житлової забудови) вводиться просторовий множник вразливості $v(s)$ для локації s , тоді ризик уточнюється за виразом:

$$R_s(t, \tau) = v(s) R(t, \tau). \quad (13)$$

Нами сформована специфікація подій і параметрів запропонованої моделі, яка представлена у таблиці 2. Запропонована таблиця 2 використовується як формалізована «карта подій» для узгодження між технологіями, екологами та управлінцями. Вона спрощує налаштування ваг w_i , α_k та порогів θ_1, θ_2 , а також підтримує аудит рішень.

Оновлення параметрів та узгодження з фактичними подіями

Для забезпечення практичної придатності моделі важливо закріпити механізм переоцінки ваг та параметрів у часі. Якщо зафіксовано реальні події

$y_i(t) \in \{0, 1\}$, то важливою є калібрувальна поправка до прогнозів. Наприклад через ізотонічну регресію або плаваючий коефіцієнт калібрування γ_i :

$$p_i^{cal}(t, \tau) = \sigma(\gamma_i \cdot \text{logit}(p_i(t, \tau))). \quad (14)$$

При цьому ваги w_i коригуються за принципом зростання пріоритету для подій, які дають найбільший внесок у реальні втрати або повторювані скарги. У результаті модель зберігає інтерпретованість (через структуру «імовірність × наслідки»), але набуває адаптивності до змін сезонності, логістики та стану інфраструктури.

Таблиця 2 – Структура подій, прогнозних ознак та оцінок наслідків використовуваних у моделі прогнозування екологічних ризиків

Подія E_i	Приклади основних ознак $z(t, \tau)$	Компоненти наслідків c_i	Типова інтерпретація d_i
Витік фільтрату	рівень (тиск) у смностях, опади, стан дренажу, наповненість	$c^{(w)}, c^{(s)}$	ризик забруднення вод/ґрунтів
Запахове навантаження	температура, вологість, інтенсивність аерації, вітер	$c^{(a)}, c^{(h)}$	дискомфорт (скарги населення)
Домішки у фракції	частка неорганіки, якість сортування, маршрути	$c^{(s)}, c^{(h)}$	погіршення якості компосту (санітарні ризику)
Збій біопроецесу	температура, рН, C/N, час витримки	$c^{(a)}, c^{(w)}$	Викиди (фільтрат)

Представлена структурно-логічна модель інтегральної оцінки екологічних ризиків забезпечує чіткий перехід від даних до прогнозу, від прогнозу до числової інтегральної оцінки ризику та від оцінки ризику до класифікації рівнів ризику з подальшим формуванням управлінських рішень для заданої громади.

Нами представлено рекомендовані управлінські дії для кожного класу (табл. 3).

Формалізація ефекту зниження екологічного ризику

Очікуваний ефект від впровадження комплексу управлінських заходів $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ пропонується описувати у вигляді функції зменшення інтегрального ризику:

$$\Delta R(t, \tau) = R_{before}(t, \tau) - R_{after}(t, \tau), \quad (15)$$

де $R_{before}(t, \tau)$ – інтегральний ризик до впровадження управлінських дій; $R_{after}(t, \tau)$ – інтегральний ризик після їх реалізації. інтегральний ризик після їх реалізації.

Таблиця 3 – Рекомендовані управлінські дії залежно від класу екологічного ризику

Клас ризику	Умови	Характер ризику	Рекомендовані управлінські дії	Пріоритет
Низький	$R(t, \tau) < \theta_1$	Фонові екологічні наванта-ження, стабільні процеси	Плановий моніторинг, профілактичне обслуговування, корегування регламентів, оптимізація логістики потоків відходів	Низький
Помірний	$\theta_1 \leq R(t, \tau) < \theta_2$	Локальні ризики, потенційні відхилення	Адаптивне управління процесами, корегування маршрутів, підсилення контролю якості, локальні технічні втручання, сценарне планування	Середній
Високий	$R(t, \tau) \geq \theta_2$	Критичні екологічні загрози, висока імовірність негативних наслідків	Негайні управлінські рішення, аварійні регламенти, обмеження операцій, екстрена логістична переорієнтація, мобілізація резервних потужностей	Високий

З урахуванням впливу окремих управлінських заходів ефект описується як:

$$R_{\text{after}}(t, \tau) = R(t, \tau) \cdot \prod_{k=1}^m (1 - \eta_k), \quad (16)$$

де $\eta_k \in [0,1]$ – коефіцієнт ефективності k-го управлінського рішення, що відображає частку зниження ризику за рахунок відповідної дії.

Відповідно, очікуваний інтегральний ефект зниження ризику визначається за формулою:

$$\Delta R(t, \tau) = R(t, \tau) \left(1 - \prod_{k=1}^m (1 - \eta_k) \right). \quad (17)$$

Запропонована модель дозволяє інтерпретувати управлінські дії як керовані впливи на структуру ризику, що змінюють як імовірності настання негативних подій $p_i(t, \tau)$, так і величину потенційних екологічних наслідків $d_i(t, \tau)$. Коефіцієнти ефективності η_k визначаються на основі історичних даних, експертних оцінок та результатів машинного навчання, що забезпечує адаптивний характер процесу управління ризиками. Такий підхід формує замкнений контур «прогнозування → оцінка → управління → навчання», який є основою інтелектуального ризик-орієнтованого управління у циркулярних системах поводження з органічними відходами.

Висновки. Розроблена структурно-функціональна модель інтелектуальної системи прогнозування екологічних ризиків у циркулярних системах управління органічними відходами забезпечує інтеграцію різних джерел інформації, аналітичних механізмів та прогнозних модулів у єдиний керований контур. Він сформований у вигляді 6-рівневої архітектури, що включає 12 функціональних процесів та 20 логічних і інформаційних зв'язків між модулями збору даних, агрегації, аналітичної інтеграції, прогнозування, оцінювання ризиків і підтримки прийняття рішень. Це забезпечує виконання процесів безперервного моніторингу, адаптивного аналізу та системної підтримки управлінських рішень у системах циркулярного управління органічними відходами.

Запропонована структурно-логічна модель інтегральної оцінки екологічних ризиків дозволяє формалізувати процес прогнозування небезпечних

подій з урахуванням як імовірнісної складової їх настання, так і потенційних екологічних наслідків. Вона передбачає виконання 7 взаємопов'язаних процесів, вміщує 5 основних функціональних модулів, а також 3 контури зворотного зв'язку та 15 інформаційно-логічних зв'язків між блоками прогнозування, оцінювання наслідків, інтеграції, категоризації ризиків і формування управлінських рішень. Це забезпечує уніфіковану формалізацію стану ризиків, їх класифікацію та системну трансформацію аналітичних результатів у прикладні управлінські дії у системі підтримки прийняття управлінських рішень.

Отримані результати формують методологічну основу для побудови інтелектуальних інформаційних систем екологічної безпеки в умовах циркулярної економіки, забезпечують науково обгрунтовану інтеграцію прогнозування, оцінювання та управління ризиками, а також створюють передумови для впровадження ризик-орієнтованих стратегій розвитку муніципальних систем управління органічними відходами.

Список літератури

- Seyyedi S. R., Kowsari E., Gheibi M., Chinnappan A., Ramakrishna S. A comprehensive review of integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 429. Article 142584. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142584
- Kazuva E., Zhang J., Tong Z., Si A., Na L. The DPSIR model for environmental risk assessment of municipal solid waste in Dar es Salaam city, Tanzania. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15, no. 8. Article 1692. doi: 10.3390/ijerph15081692
- Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. P. 757–768. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
- Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Vol. 127. P. 221–232. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
- Bibri S. E., Krogstie J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*. 2017. Vol. 31. P. 183–212. doi: 10.1016/j.scs.2017.02.016
- Zeng G., Jiang Y., Wu Z. Integrated risk assessment of environmental hazards: A systematic approach. *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 67. P. 329–340. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.03.006
- Bushuyev S., Chumachenko I., Galkin A., Bushuiev D., Dotsenko N. Sustainable development projects implementing in BANI

- environment based on AI tools. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 6. Article 2607. doi: 10.3390/su17062607
8. Лисенко О. О., Кононенко І. В. Модель вибору сторонніх інструментів в IT-проектах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. 2025. № 2 (11). С. 37–46. doi: 10.20998/2413-3000.2025.11.5
 9. Гринченко М., Роговий М., Гринченко Є. Розробка інформаційних технологій для інтелектуального планування роботи команди IT-проекту на основі гнучкої методології. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. 2024. № 2 (9). С. 9–15. doi: 10.20998/2413-3000.2024.9.2
 10. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. Cyber-physical systems for smart manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
 11. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009325844
 12. UN Environment Programme. *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781108627146
 13. Tryhuba A., Mudryk K., Tryhuba I., Kotsylovskiy M., Sorokin D., Bezalychna O., Pysz P., Hutsol T. Models for sustainable management of livestock waste based on neural network architectures. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no. 1. Article 28082. doi: 10.1038/s41598-025-13150-9
 14. Tryhuba A., Tryhuba I., Oliinyk R., Andrushkiv O., Kotsylovskiy M. An intelligent model for identifying risks of power supply projects for critical infrastructure facilities in the conditions of emergency and martial law. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 4023. P. 32–47. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4023/paper4.pdf> (дата звернення: 18.05.2026).
 15. Tryhuba I., Tryhuba A., Hutsol T., Faichuk O., Slavina N. European Green Deal: Substantiation of the rational configuration of the bioenergy production system from organic waste. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 17. Article 4513. doi: 10.3390/en17174513
 - and Recycling. 2017, vol. 127, pp. 221–232. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
 5. Bibri S. E., Krogstie J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*. 2017, vol. 31, pp. 183–212. doi: 10.1016/j.scs.2017.02.016
 6. Zeng G., Jiang Y., Wu Z. Integrated risk assessment of environmental hazards: A systematic approach. *Ecological Indicators*. 2016, vol. 67, pp. 329–340. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.03.006
 7. Bushuyev S., Chumachenko I., Galkin A., Bushuyev D., Dotsenko N. Sustainable development projects implementing in BANI environment based on AI tools. *Sustainability*. 2025, vol. 17, no. 6, article 2607. doi: 10.3390/su17062607
 8. Lysenko O. O., Kononenko I. V. Model' vyboru storonnikh instrumentiv v IT-proyektakh [Model for selecting third-party tools in IT projects]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2025, no. 2 (11), pp. 37–46. doi: 10.20998/2413-3000.2025.11.5
 9. Hrynchenko M., Rohovyy M., Hrinchenko Ye. Rozrobka informatsiynykh tekhnolohiy dlya intelektual'noho planuvannya roboty komandy IT-proyektu na osnovi hnuchkoyi metodolohiyi [Development of information technologies for intelligent planning of the IT project team work based on agile methodology]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Stratehichne upravlinnya, upravlinnya portfelyamy, prohramamy ta proektamy* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Strategic Management, Portfolio, Program and Project Management]. 2024, no. 2 (9), pp. 9–15. doi: 10.20998/2413-3000.2024.9.2
 10. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. Cyber-physical systems for smart manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2015, vol. 3, pp. 18–23. doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001
 11. IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009325844
 12. UN Environment Programme. *Global Environment Outlook - GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge, Cambridge University Press, 2019. doi: 10.1017/9781108627146
 13. Tryhuba A., Mudryk K., Tryhuba I., Kotsylovskiy M., Sorokin D., Bezalychna O., Pysz P., Hutsol T. Models for sustainable management of livestock waste based on neural network architectures. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, no. 1, article 28082. doi: 10.1038/s41598-025-13150-9
 14. Tryhuba A., Tryhuba I., Oliinyk R., Andrushkiv O., Kotsylovskiy M. An intelligent model for identifying risks of power supply projects for critical infrastructure facilities in the conditions of emergency and martial law. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025, vol. 4023, pp. 32–47. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-4023/paper4.pdf>.
 15. Tryhuba I., Tryhuba A., Hutsol T., Faichuk O., Slavina N. European Green Deal: Substantiation of the rational configuration of the bioenergy production system from organic waste. *Energies*. 2024, vol. 17, no. 17, article 4513. doi: 10.3390/en17174513

References

1. Seyyedi S. R., Kowsari E., Gheibi M., Chinnappan A., Ramakrishna S. A comprehensive review of integration of digitalization and circular economy in waste management by adopting artificial intelligence approaches: Towards a simulation model. *Journal of Cleaner Production*. 2024, vol. 429, article 142584. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142584
2. Kazuva E., Zhang J., Tong Z., Si A., Na L. The DPSIR model for environmental risk assessment of municipal solid waste in Dar es Salaam city, Tanzania. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018, vol. 15, no. 8, article 1692. doi: 10.3390/ijerph15081692
3. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 2017, vol. 143, pp. 757–768. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
4. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation*

Надійшла (received) 25.12.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Тригуба Анатолій Миколайович (Tryhuba Anatoliy) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, м. Львів, Україна; email: trianamik@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8014-5661>

Тригуба Інна Леонтівна (Tryhuba Inna) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, завідувач кафедри генетики, селекції та захисту рослин, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, м. Львів, Україна; email: trinle@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5239-5951>

Фірман Ігор Романович (Firman Ihor) – здобувач кафедри інформаційних технологій та систем електронних комунікацій, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна; email: firmanigorromanovuch@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5840-9815>

Фамуляк Володимир Юрійович (Famuliak Volodymyr) – аспірант кафедри інформаційних технологій, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, м. Львів, Україна; email: vovfam@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5347-9427>

Коваль Назарій Ярославович (Koval Nazarii) – доктор філософії (PhD), проректор, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна; email: kovaln870@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7846-2924>