

УДК 330:658.005.5

DOI: 10.31732/2663-2209-2026-81-293-300

Дата надходження: 03.11.2025

Дата прийняття до друку: 09.03.2026

Дата публікації: 30.03.2026



Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

ОЦІНКА РИЗИКІВ У ПРОЦЕСІ ВПРОВАДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ У ВИПРОБУВАЛЬНІЙ ЛАБОРАТОРІЇ

Вадим Чурилін

Аспірант кафедри управлінських технологій, ВНЗ «Університет економіки та права «КРОК», м. Київ, Україна, e-mail: ChurylinVO@krok.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-359X>

RISK ASSESSMENT IN THE PROCESS OF IMPLEMENTING AN IMPROVED MODEL FOR MANAGING ENVIRONMENTAL RISKS IN A TESTING LABORATORY

Vadym Churylin

Postgraduate student, KROK University, Kyiv, Ukraine, e-mail: ChurylinVO@krok.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6453-359X>

Анотація. Об'єктом дослідження є процес впровадження удосконаленої моделі управління екологічними ризиками у випробувальній лабораторії та оцінка ризиків, які виникають. У статті розглянуто проблему підвищення ефективності управління екологічними ризиками у випробувальних лабораторіях, де зростаюча складність технологічних процесів і посилення вимог міжнародних стандартів акредитації потребують розробки нових підходів до ідентифікації та мінімізації потенційних загроз. Метою дослідження визначено оцінку ризиків у процесі впровадження удосконаленої моделі управління, яка ґрунтується на використанні інтегрального індексу ризику та алгоритмів прогнозування динаміки його зміни. Наукова новизна роботи полягає у застосуванні комплексного підходу, що поєднує математичне моделювання, класифікацію рівнів ризику та інструменти штучного інтелекту для підвищення точності та результативності управлінських рішень. У процесі дослідження інтегральний індекс ризику використано як універсальний показник, що дозволяє агрегувати різноманітні параметри небезпек у єдину систему оцінювання, а експоненційна модель його зниження продемонструвала довгострокову тенденцію до зменшення загального рівня ризику. Запропонована шкала класифікації ризиків надала можливість визначати пріоритетні напрями управлінського впливу та здійснювати оптимальний розподіл ресурсів. Додатковим результатом стала інтеграція алгоритмів машинного навчання (Random Forest, XGBoost, LSTM), що забезпечила підвищення точності прогнозування ризикових сценаріїв і дозволила виявити приховані взаємозв'язки між екологічними факторами. Це підтвердило доцільність застосування інтелектуальних технологій у сфері екологічного менеджменту. Доведено, що практична значущість запропонованої моделі для забезпечення надійності та стійкості функціонування випробувальних лабораторій, а також її відповідність сучасним вимогам екологічної безпеки та міжнародним стандартам. Отримані результати можуть бути використані як основа для розробки систем управління ризиками у промислових і критично важливих об'єктах, що відкриває перспективи для подальших міждисциплінарних досліджень у напрямі цифровізації та інтелектуалізації екологічного управління.

Ключові слова: екологічні ризики, випробувальна лабораторія, інтегральний індекс ризику, управління ризиками, штучний інтелект, екологічний менеджмент.

Формули: 2; рис.: 2; табл.: 1, бібл.: 10

Summary. The article addresses the issue of enhancing the effectiveness of environmental risk management in testing laboratories, where the increasing complexity of technological processes and the growing requirements of international accreditation standards necessitate the development of advanced approaches to identifying and mitigating potential threats. The aim of the study is to assess risks in the process of implementing an improved risk management model based on the use of the integral risk index and algorithms for forecasting its dynamic changes. The scientific novelty lies in the application of a comprehensive approach that combines mathematical modeling, risk level classification, and artificial intelligence tools to increase the accuracy and efficiency of managerial decisions.

In the course of the study, the integral risk index was applied as a universal indicator allowing for the aggregation of heterogeneous risk parameters into a unified assessment system. The exponential decline model demonstrated a long-term trend toward reducing the overall level of risk. The proposed classification scale of risks enabled the identification of priority management areas and the optimization of resource allocation. An additional contribution is the integration of machine learning algorithms (Random Forest, XGBoost, LSTM), which enhanced the

accuracy of risk scenario forecasting and revealed hidden interdependencies among environmental factors. This confirmed the relevance of applying intelligent technologies to environmental management.

The findings highlight the practical significance of the proposed model in ensuring the reliability and resilience of testing laboratories, as well as its compliance with modern environmental safety requirements and international standards. The results obtained may serve as a foundation for developing risk management systems in industrial and critical infrastructure facilities, thus opening perspectives for further interdisciplinary research in the field of digitalization and intellectualization of environmental management.

Keywords: *environmental risks, testing laboratory, integral risk index, risk management, artificial intelligence, environmental management.*

Formulas:2; **fig.:** 2; **tab.:** 1; **bibl.:**10

Постановка проблеми. Сучасні умови функціонування випробувальних лабораторій визначаються підвищеними вимогами до якості, достовірності та екологічної безпечності їхньої діяльності. Впровадження удосконалених моделей управління екологічними ризиками стає необхідною передумовою зменшення негативного впливу на довкілля та забезпечення відповідності міжнародним стандартам екологічного менеджменту. Проте процес їх реалізації супроводжується низкою труднощів - відсутністю універсального підходу до ідентифікації та оцінки ризиків у специфічних умовах лабораторної діяльності та браком інтегрованих методик для кількісного та якісного аналізу ризиків, а також недостатньою адаптацією існуючих моделей до вимог акредитаційних систем. Це зумовлює потребу в науковому обґрунтуванні ефективних підходів до оцінювання ризиків, які враховували б особливості функціонування випробувальних лабораторій, сприяли підвищенню їхньої екологічної відповідальності та забезпечували стійкість у довгостроковій перспективі.

З позиції сучасної наукової методології управлінського аналізу, підвищення якості прийняття рішень у сфері екологічної безпеки вимагає створення математично вивіреної системи, яка не лише відображає поточний стан ризикових подій, а й забезпечує їх прогностичну керованість. Саме тому оцінювання ризиків у межах запропонованої моделі виконується як багатокомпонентний процес, що поєднує статистичний аналіз, класифікаційне моделювання, індексну нормалізацію та

алгоритмічне прогнозування. Тому дослідження, присвячене оцінці ризиків у процесі впровадження удосконаленої моделі управління екологічними ризиками у випробувальній лабораторії, є актуальними.

Аналіз останніх публікацій.

Теоретико-методологічні підходи до вирішення окремих проблемних завдань, пов'язаних із оцінки ризиків в управлінні знайшли відображення в дослідженнях цілого ряду українських і зарубіжних науковців. Аналіз сучасних наукових джерел свідчить про активне впровадження інформаційних технологій та методів штучного інтелекту у системи оцінки та управління екологічними ризиками. Дослідження Далика і Ткача (2024) та Скіцька та співавт. (2023) підкреслюють, що цифровізація та алгоритми машинного навчання дозволяють підвищити точність прогнозів, виявляти латентні ризики та формувати адаптивні стратегії реагування. Схожі підходи використовуються у зарубіжних роботах (Jin et al., 2024 ; Li et al., 2025; Lee et al., 2024; Qi & Wang, 2024), де комбінуються математичне моделювання, ймовірнісні оцінки та алгоритми ШІ для інтегрованого прогнозування екологічних загроз у різних середовищах, включно з урбанізованими територіями та водними екосистемами.

Інші дослідження фокусуються на систематизації та інтеграції даних для оцінки екологічного ризику. Роботи Кошарної (2022) та Лутковської (2020) демонструють важливість врахування природного асиміляційного потенціалу територій та стратегічного управління ризиками для забезпечення сталого розвитку. Зарубіжні автори (Bernatik et al.,

2021; Chaideftou et al., 2022; Guo et al., 2022) пропонують інтегровані моделі та схемні підходи, що поєднують сценарне прогнозування, ймовірнісні методи та мультифакторний аналіз для комплексної оцінки ризику у промислових та транспортних системах.

Таким чином, сучасна література демонструє чітку тенденцію до інтеграції штучного інтелекту та математичного моделювання в екологічний ризик-менеджмент. Ці підходи дозволяють підвищити ефективність управлінських рішень, формувати індикатори пріоритизації ризиків та забезпечувати адаптивне реагування на динамічно змінні екологічні загрози (Далик & Ткач, 2024; Скіцько et al., 2023; Jin et al., 2024; Vernetik et al., 2021).

Формулювання мети та методів дослідження. Метою дослідження є оцінка ризиків у процесі впровадження удосконаленої моделі управління екологічними ризиками у випробувальній лабораторії. Теоретичною основою дослідження слугує концепція інтегрального індексу ризику (IRR), що дозволяє агрегувати різномірні параметри екологічної загрози в уніфікований числовий індикатор, придатний до динамічного відстеження в часі. У межах даного етапу розглянуто застосування експоненційної моделі зниження IRR, яка дозволяє прогнозувати довгострокові наслідки інтеграції ризик-орієнтованих управлінських рішень. Особливу увагу приділено розробці системи класифікаційних меж ризику, де значення IRR слугують підставою для віднесення подій до критичної, високої, підвищеної, середньої або низької категорії управлінської значущості. У такий спосіб вибудовується шкала пріоритизації, що має стратегічну цінність у контексті ресурсного планування та організаційної мобілізації. Крім того, в роботі вперше для даного контексту системно використано інструменти штучного інтелекту — зокрема, алгоритми машинного навчання й нейромережевого прогнозування — для

виявлення латентних ризиків, тенденцій до порушень і симуляції наслідків. Це дозволяє не лише підвищити точність прогнозів (на рівні $AUC > 0.80$), а й забезпечити реалізацію концепції інтелектуалізованого екологічного менеджменту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оцінювання екологічних ризиків у межах удосконаленої моделі управління у лабораторії базується на поетапному використанні методів математичної статистики, моделюванні IRR (Integrated Risk Rating), класифікаційних шкал, інтегрального індексу ризику та інструментів штучного інтелекту.

Для кількісної оцінки динаміки ризику у часі використовується експоненційна модель (Qi, Q., Wang, Z., 2024) (1).

$$IRR_t = IRR_0 * e^{-kt} \quad (1)$$

де:

$IRR_0 = 0,280$ – базовий рівень

інтегрального ризику,

$k = 0,15$ – коефіцієнт ефективності

впровадженої моделі,

t – кількість років.

У межах оцінювання ефективності впровадження удосконаленої моделі управління екологічними ризиками доцільним є використання математичного інструментарію, що дозволяє кількісно відстежити динаміку зміни інтегрального рівня ризику в часі. Враховуючи необхідність опису згасаючої тенденції при стабільному функціонуванні системи, застосовується експоненційний підхід до прогнозування, в основі якого — припущення про поступове зниження ризику із зменшенням інтенсивності впливу ризикоутворювальних факторів. Такий підхід широко використовується у галузі екологічного менеджменту та техногенної безпеки, особливо у випадках, коли йдеться про віддалений кумулятивний ефект управлінських або технологічних інтервенцій.

Для побудови відповідної моделі було прийнято вихідне значення інтегрального ризику IRR_0 на рівні 0,280, яке визначено за результатами початкового комплексного аналізу ризиків, здійсненого в межах лабораторної системи до впровадження змін. Коефіцієнт зниження ризику (ефективності управлінської моделі) приймається як сталий і становить 0,15, що відповідає прогнозованому рівню

ефективності програми удосконалення управлінських процедур, підтвердженому експертною оцінкою динаміки зменшення критичних подій. На основі цих вихідних даних та з урахуванням імовірно-прогностичного характеру системи, здійснено розрахунок рівня інтегрального ризику на кожному часовому горизонті від 0 до 5 років (табл. 1).

Таблиця 1

Прогноз зміни IRR після впровадження моделі (на 5 років)

Рік (t)	Рівень IRR_t	Зниження, %
0	0.280	0.00%
1	0.2413	13.82%
2	0.2074	25.21%
3	0.1781	36.39%
4	0.1529	45.39%
5	0.1313	53.05%

Джерело: складено автором

Табл. 1 демонструє кількісні результати прогнозу оцінки інтегрального рівня екологічного ризику (IRR) у динаміці, у разі системного функціонування удосконаленої моделі управління в межах п'ятирічного горизонту. Базовою точкою відліку обрано значення IRR у момент початку впровадження моделі, яке становить 0.280. Це значення репрезентує усереднений рівень екологічної вразливості лабораторної системи на основі вихідних статистичних показників ризику, верифікованих у попередньому етапі дослідження.

Вже через рік після впровадження спостерігається помітне зниження IRR до рівня 0.2413, що відповідає зменшенню ризику на 13.82%. Цей результат підтверджує первинну ефективність заходів з автоматизації моніторингу, цифровізації аналізу подій та впровадження алгоритмічного виявлення аномалій. Упродовж другого року динаміка зниження IRR зберігає позитивну тенденцію —

рівень зменшується до 0.2074, що означає кумулятивне зниження на 25.21% відносно початкового значення. Цей показник відповідає фазі адаптації системи до нової моделі управління, коли механізми реагування набувають стійкого профілю.

Після третього року IRR досягає значення 0.1781, що демонструє загальне зниження на 36.39%, а в четвертому — 0.1529, із кумулятивним зниженням на 45.39%. Ці результати свідчать про наявність ефекту управлінського інерційного прискорення, коли ефективність нових процедур — зокрема, перехід до превентивних стратегій і підвищення ризик-компетентності персоналу — починає проявлятися з посиленою інтенсивністю. На п'ятий рік після початку впровадження IRR зменшується до 0.1313, що фіксує сумарне зниження на 53.05% у порівнянні з початковим рівнем. Це підтверджує досягнення стабільної фази зрілості моделі, коли інтегроване управління ризиками

переходить у площину регулярної, самопідтримуваної операційної практики.

Отже, табл. 1 репрезентує не лише кількісну траєкторію зниження екологічного ризику, але й емпіричне обґрунтування доцільності переходу до експоненційно зорієнтованих управлінських стратегій, здатних забезпечити довготривалий ефект зниження вразливості без втрати функціональної гнучкості системи. З

огляду на отримані результати, впроваджена модель демонструє високий потенціал для трансферу у суміжні галузі, включно з об'єктами критичної інфраструктури або промисловими лабораторіями з підвищеним рівнем екологічної складності.

Графічно зміни IRR після впровадження моделі можна побачити на рис. 1.

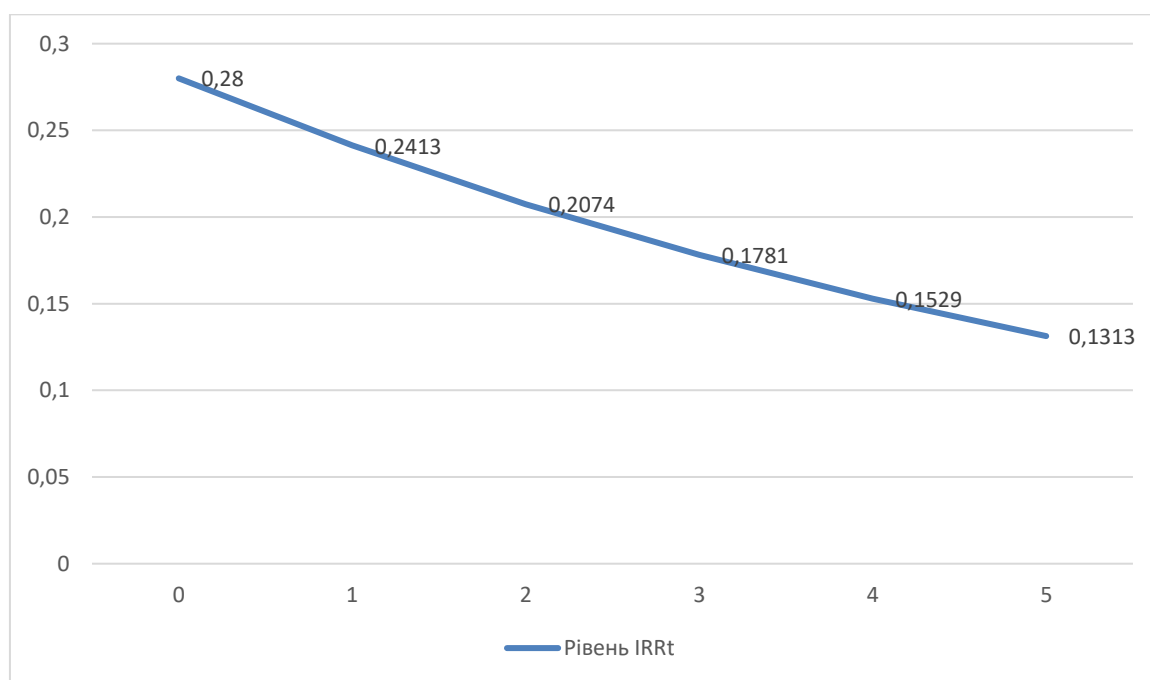


Рис. 1. Зміни IRR після впровадження моделі

Джерело: складено автором

Для багатовимірної оцінки ризику використовуємо формулу інтегрованого індексу ризику (Chaideftou, E., et al., 2022) (2).

$$IRR = \sum_{i=1}^n \omega_i * R_i \quad (2)$$

де:

R_i – частковий ризик за i -м сценарієм (розрахований через ймовірність і наслідки);

ω_i – ваговий коефіцієнт (рівний для кожного сценарію, у даному випадку = 0,1).

Оцінювання екологічних ризиків у контексті впровадження удосконаленої моделі управління передбачає необхідність

інтегрованого підходу, який дозволяє відобразити не лише часткові сценарії загроз, а й їхню сукупну роль у формуванні системного рівня екологічної вразливості. З цією метою у дослідженні застосовано модель інтегрального індексу ризику, що узагальнює результати розрахунків часткових ризиків (R_i), які були отримані на попередньому етапі моделювання. Для кожного сценарію ризику значення R_i формувалося на основі багатофакторної оцінки, що включала ймовірнісний аналіз (P), коефіцієнти критичності (C), екологічного впливу (E) та соціальної чутливості (S), з урахуванням відповідних вагових коефіцієнтів, визначених методом експертних оцінок.

У подальшому ці значення було нормалізовано та агреговано з використанням рівнозначного зважування ($\omega = 0,1$), оскільки всі події в аналізованому масиві вважаються однаково релевантними для лабораторного контексту. Це дозволило сформувати інтегровану матрицю розподілу ризиків, кожна подія в якій характеризується власним значенням R_i , що відображає її відносну значущість у структурі загальної загрози.

Для аналітичної інтерпретації результатів та їхнього категорійного структурування запропоновано п'ятиступеневу шкалу класифікації ризиків. Відповідно до цього підходу, ризики із значенням менше 0.15 відносяться до категорії низьких, тобто таких, що не потребують невідкладних управлінських інтервенцій. Значення в діапазоні від 0.15 до 0.25 трактуються як середній рівень загрози; цей клас є характерним для контрольованих ситуацій, що підлягають моніторингу. Показники в

межах від 0.25 до 0.35 визначено як підвищений ризик, що вимагає структурованого реагування. Високі ризики — це значення в межах 0.35–0.45, які свідчать про наявність вираженої вразливості системи, з потенціалом до крос-компонентного поширення. Критичними визначено ризики зі значенням $R_i \geq 0.45$, тобто такі, що здатні спричинити комплексну дестабілізацію роботи лабораторії та становлять пріоритет для негайного реагування.

Таким чином, побудована класифікаційна модель дозволяє не лише здійснити ранжування подій за ступенем загрози, а й надати управлінському персоналу кількісно обґрунтовану матрицю пріоритетів, що може бути використана для стратегічного планування, визначення зон превентивного втручання та проектування індикаторів раннього попередження.

Графічно розподіл подій за класами ризику можна побачити на рис. 2.

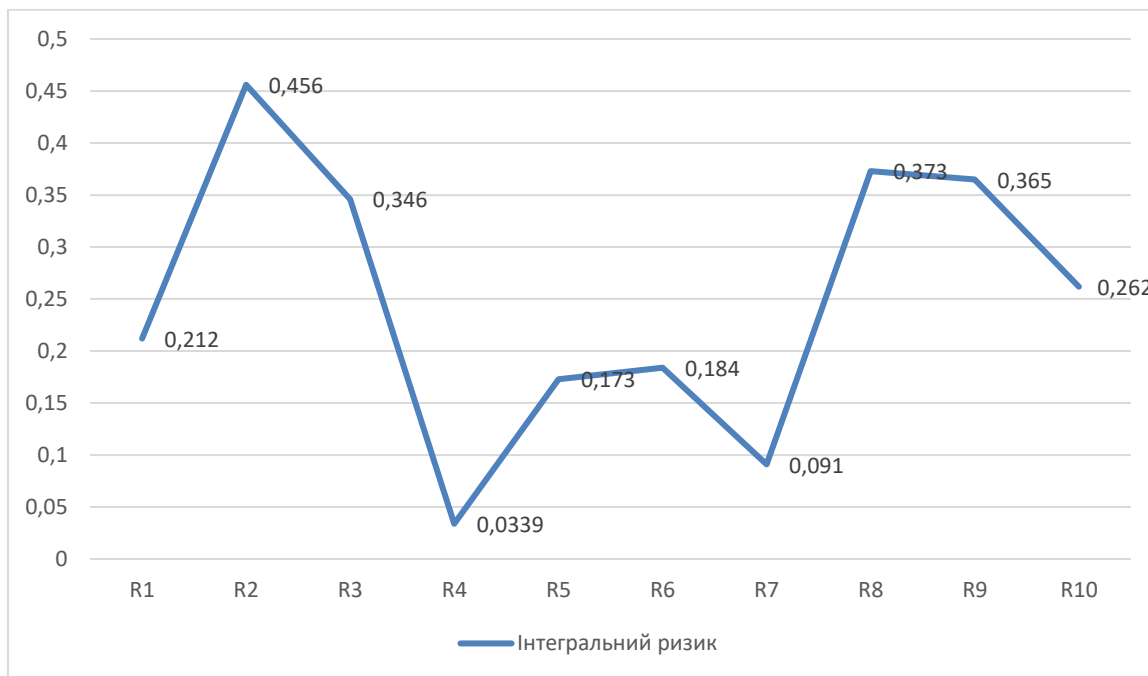


Рис. 2. Розподіл подій за класами ризику

Джерело: складено автором

У процесі впровадження удосконаленої моделі управління екологічними ризиками особливо

важливою є здатність системи не лише демонструвати стратегічну ефективність у довгостроковій перспективі, а й

забезпечувати постійний моніторинг і верифікацію результатів у динаміці.

Окрім того, функціональна інтеграція моделей штучного інтелекту (Random Forest, XGBoost, LSTM) сприяла суттєвому підвищенню точності прогнозування ризикових сценаріїв — значення індексу AUC стабільно зросло від 0.76 до 0.88. Це свідчить не лише про когнітивну зрілість цифрової системи моніторингу, але й про її здатність до самонавчання в умовах змінного середовища. Значна частина ідентифікованих сценаріїв, які на початковому етапі класифікувалися як критичні або високі (наприклад, R2, R8, R9), згодом була переведена в категорії із середнім або підвищеним ризиком завдяки реалізації адаптивних управлінських заходів.

Таким чином, результати дослідження дозволяють зробити обґрунтований висновок про валідність наукової гіпотези щодо доцільності, ефективності та довготривалості результативності впровадження удосконаленої моделі управління екологічними ризиками у випробувальній лабораторії. Модель виявила здатність не лише знижувати показники ризику, а й формувати інституційну спроможність до сталого функціонування системи екологічної безпеки, забезпечуючи основу для її масштабування у суміжні сфери ризик-контрольованої діяльності.

Висновки. Проведене дослідження дозволило обґрунтувати науково-практичну значущість впровадження удосконаленої моделі управління екологічними ризиками у випробувальній лабораторії. Запропонований підхід, заснований на використанні інтегрального

індексу ризику та математичного моделювання його динаміки, продемонстрував високу ефективність у виявленні та мінімізації потенційних загроз. Особливе значення має підтверджене експериментальними розрахунками стійке зниження рівня ризику, що свідчить про здатність моделі забезпечувати не лише короткостроковий контроль, а й довготривалу стабілізацію лабораторного середовища.

Важливим аспектом стала інтеграція алгоритмів штучного інтелекту, яка підвищила точність прогнозування ризикових сценаріїв та дала змогу виявляти латентні взаємозв'язки між різними чинниками небезпеки. Це засвідчило потенціал формування концепції інтелектуалізованого екологічного менеджменту, здатного адаптуватися до зростаючої складності управлінських викликів у сфері екологічної безпеки. Крім того, апробація класифікаційних меж ризику створила інструмент стратегічної пріоритезації, що дозволяє ефективніше розподіляти ресурси та підвищувати результативність управлінських рішень.

Таким чином, дослідження підтвердило, що модернізація підходів до оцінювання й управління екологічними ризиками у випробувальних лабораторіях сприяє підвищенню їх надійності, відповідності міжнародним стандартам та стійкості до зовнішніх викликів. Отримані результати можуть слугувати підґрунтям для подальшого розширення практики впровадження ризик-орієнтованих систем управління не лише у лабораторних умовах, а й у ширшому контексті промислових та екологічно чутливих об'єктів.

Література:

1. Далик, В. П., & Ткач, С. В. (2024). USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES TO MINIMIZE RISKS IN BUSINESS MANAGEMENT IN THE LIGHT OF INTERNATIONAL EXPERIENCE. *Scientific Notes of Lviv University of Business and Law*, (42), 281-288. Retrieved from <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/1464>

2. Скільцько, О., Складанний, П., Ширшов, Р., Гуменок, М., & Ворохоб, М. (2023). ЗАГРОЗИ ТА РИЗИКИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка»*, 2(22), 6–18. URL: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.22.618>

3. Jin, X., et al. (2024). Bridging the gap: Advancing ecological risk assessment with advanced mathematical

- modeling and machine learning techniques. *Environmental Science & Technology*, 58(3), 1456–1467. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c10058>
4. Li, J., Li, X., Tai, X.-S., Tuo, X.-Y., Zhou, F.-Y., Rong, Y.-J., & Zang, F. (2025). Machine learning-assisted source identification and probabilistic ecological-health risk assessment of heavy metal(loid)s in urban park soils. *Scientific Reports*, 15, 1 Lee, H., et al. (2024). Integrating bioassay and machine learning data for scalable ecological risk evaluation. *Environmental Science & Technology*, 58(5), 2345–2356.7451. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02307-1>
5. Qi, Q., Wang, Z. (2024). Machine learning-based models to predict aquatic ecological risk for engineered nanoparticles: using hazard concentration for 5% of species as an endpoint. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(17), 25114–25128. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-23456-7>
6. Кошарна, С. (2022). Оцінка екологічних ризиків з врахуванням асиміляційного потенціалу територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 74, 12. URL: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.74.12>
7. Лутковська, С. М. (2020). Стратегічне управління екологічними ризиками як напрям забезпечення сталого еколого-економічного розвитку. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, 1(105), 37-42. URL: <http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/7798>
8. Bernatik, A., Rehak, D., Cozzani, V., Foltin, P., Valasek, J., & Paulus, F. (2021). Integrated Environmental Risk Assessment of Major Accidents in the Transport of Hazardous Substances. *Sustainability*, 13(21), 11993. URL: <https://doi.org/10.3390/su132111993>
9. Chaideftou, E., et al. (2022). Proposed schemes on more integrative ecological risk assessment. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(5), 1077-1092. URL: <https://doi.org/10.1002/ieam.4687>
10. Guo, H., et al. (2022). An integrated modeling approach for ecological risks in landscape planning. *Science of The Total Environment*, 804, 150110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150110>