

DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).76-91](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).76-91)
УДК 624.012.45:502.131.1:658.26:004.9

О.М. Малихіна

д.е.н., проф. кафедри менеджменту в будівництві
ORCID: 0000-0002-3683-570X

І.І. Федун

д.е.н., проф., проф. кафедри фінансово економічної безпеки
ORCID: 0000-0002-1012-9970

Д.М. Ніколайко

асп. кафедри менеджменту в будівництві
ORCID: 0009-0001-4118-442X

А.С. Мовсесян

асп. кафедр и менеджменту в будівництві
ORCID: 0009-0000-9823-4208

О.Г. Литарев

асп. кафедри менеджменту в будівництві
ORCID: 0009-0006-1944-5925

*Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ
Національна Академія Служби Безпеки України, м. Київ*

ІНСТРУМЕНТАРІЙ СТРАТЕГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ІНВАЙРОНМЕНТАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ БУДІВЕЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ У ЦИФРОВОМУ ТА РИЗИКООРІЄНТОВАНОМУ КОНТЕКСТІ

У даній роботі досліджується інструментарій стратегічного оцінювання рівня інвайронментальної безпеки будівельних підприємств у цифровому та ризикоорієнтованому контексті. Підкреслюється, що в умовах сучасних глобальних трансформацій екологічні аспекти діяльності будівельної галузі стають не менш важливими, ніж економічні чи технологічні. Сучасні підприємства змушені адаптуватися до посилення екологічних вимог, зростання соціального тиску та необхідності мінімізації ризиків, що виникають у процесі виробництва. Використання цифрових технологій, таких як системи моніторингу впливу на довкілля, платформи управління ризиками та аналітичні інструменти, дає змогу створювати більш точні та комплексні моделі оцінювання інвайронментальної безпеки.

Особливу увагу приділено аналізу ризикоорієнтованих підходів, які дозволяють інтегрувати результати стратегічної оцінки з управлінськими рішеннями. Це забезпечує можливість прогнозування ймовірних сценаріїв впливу діяльності будівельних підприємств на довкілля, а також формування стратегії попередження та мінімізації екологічних загроз. Важливою складовою виступає оцінка ресурсного забезпечення підприємства, що включає технологічні, фінансові та людські ресурси, які формують потенціал для підвищення рівня екологічної безпеки.

У дослідженні також акцентовано увагу на ролі ВІМ-технологій, систем штучного інтелекту та великих даних у формуванні прозорих та адаптивних механізмів екологічного контролю. Це дозволяє підвищити точність екологічних прогнозів, швидкість обробки інформації та ефективність управлінських рішень. Розглядається концепція інтеграції цифрових платформ управління із системами екологічного менеджменту для забезпечення стійкості підприємств у довгостроковій перспективі.

Отримані результати дають змогу зробити висновок, що стратегічне оцінювання рівня інвайронментальної безпеки є важливою складовою сучасної моделі управління будівельним підприємством. Використання цифрових технологій та ризикоорієнтованих методів дозволяє сформувати системний підхід, який забезпечує баланс між економічною ефективністю та екологічною відповідальністю.

Ключові слова: *інвайронментальна безпека, економічна безпека, безпекові детермінанти, загрози, будівельні підприємства, цифрові технології, ризикоорієнтований підхід, стратегічне оцінювання, екологічний менеджмент, ВІМ-технології, управління ризиками.*

Постановка проблеми. Проблематика полягає в недостатній розробленості методичного забезпечення стратегічного оцінювання інвайронментальної безпеки у будівельній галузі. Попри значний розвиток теорії екологічного менеджменту та впровадження цифрових рішень, залишається невирішеним питання інтеграції ризикоорієнтованих підходів у комплексну систему управління. Часто будівельні підприємства зосереджуються на локальних аспектах безпеки, ігноруючи взаємозв'язки між виробничими процесами, екологічними ризиками та стратегічними цілями.

Крім того, відсутні універсальні інструменти, здатні адаптуватися до різних умов функціонування підприємств і водночас забезпечувати точність прогнозів та контроль за реалізацією екологічних стратегій. Це створює потребу у формуванні нового науково-практичного інструментарію, що поєднує цифрові технології, системи управління ризиками та принципи сталого розвитку для досягнення довгострокової ефективності та безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У науковій літературі питання екологічної та інвайронментальної безпеки будівельних підприємств досліджуються у контексті сталого розвитку, управління ризиками та впровадження інноваційних технологій. Значна увага приділяється вивченню механізмів зниження викидів, використанню енергоощадних матеріалів, впровадженню ВІМ-систем для контролю ресурсів та аналізу життєвого циклу будівель. Окремі автори акцентують на важливості ризикоорієнтованих підходів у проєктуванні та експлуатації, а також на застосуванні цифрових платформ моніторингу екологічних показників. Проте комплексних досліджень, які поєднують цифровізацію, стратегічне

оцінювання та ризикоорієнтоване управління у цілісну систему інвайронментальної безпеки, поки що бракує. Недостатньо опрацьованими залишаються питання інтеграції великих даних і штучного інтелекту для прогнозування сценаріїв ризиків, а також методики стратегічної оцінки, адаптовані до специфіки українських будівельних підприємств. Це формує науковий і практичний розрив, який потребує подальших досліджень.

Метою цієї статті є розроблення науково-практичного підходу до стратегічного оцінювання рівня інвайронментальної безпеки будівельних підприємств у цифровому та ризикоорієнтованому контексті. Завданням є поєднання сучасних цифрових технологій, методів управління ризиками та принципів сталого розвитку в єдину інтегровану систему оцінювання. Особлива увага приділяється формуванню інструментарію, здатного враховувати багатовимірні чинники екологічних ризиків, забезпечувати їхнє прогнозування та дозволяти оперативно ухвалювати управлінські рішення. Розроблений підхід має забезпечити не лише зниження негативного впливу на довкілля, але й підвищення конкурентоспроможності будівельних підприємств завдяки інтеграції екологічних критеріїв у бізнес-стратегії. У перспективі це створює підґрунтя для побудови адаптивної моделі управління, що поєднує економічну ефективність із екологічною відповідальністю.

Виклад основної інформації. Поняття інвайронментальної безпеки в будівельному секторі є одним із ключових стратегічних параметрів оцінювання ефективності, надійності та сталості діяльності підприємств у сучасному цифровому та ризикоорієнтованому середовищі. На відміну від традиційного підходу, де екологічна безпека розглядалася здебільшого як виконання нормативних вимог щодо допустимих рівнів забруднення або викидів, сучасна інтерпретація цього поняття розширюється до системного бачення, що включає екологічну відповідальність, адаптивність до змін клімату, дотримання глобальних стандартів ESG, інтеграцію цифрових систем контролю, взаємодію з місцевими громадами та участь у формуванні безпечного урбаністичного середовища.

Цифрова трансформація змінює саму природу екологічного контролю. Якщо раніше будівельне підприємство реагувало на екологічні інциденти лише постфактум, то тепер завдяки застосуванню цифрових двійників (digital twins), мереж сенсорів, автоматизованих панелей моніторингу, модулів екологічного аналізу у BIM-системах (Building Information Modeling), стало можливим здійснювати прогнозування, превентивне управління та стратегічну оцінку ризиків ще до початку фактичних робіт на будівельному майданчику.

Категоріально інвайронментальна безпека охоплює низку параметрів: безпека для довкілля (викиди, стоки, шум, вплив на біорізноманіття), безпека для здоров'я населення (якість повітря, стан ґрунтів, санітарні зони), безпека матеріальних активів (стійкість до змін клімату, повеней, зсувів), а також інституційно-правову безпеку (відповідність нормам,

наявність дозволів, проходження перевірок) [1]. В умовах багатоетапної реалізації інфраструктурних проєктів ці параметри набувають критичного значення для репутації компанії, її доступу до інвестицій, а іноді — навіть для збереження ліцензії на будівельну діяльність.

У сучасному дискурсі виокремлюються три ключові концепції інвайронментальної безпеки в будівництві, кожна з яких базується на власній логіці, управлінській філософії та наборі інструментів. Ці концепції — превентивна, інтегрована та реактивна — співіснують на різних рівнях зрілості управлінських систем, різних типах підприємств і в різних соціально-інституційних контекстах.

Превентивна концепція акцентує увагу на попередженні негативного впливу ще до того, як він виникне. Це стратегія, орієнтована на прогнозування, моделювання та планування. До її складу входять такі інструменти як стратегічна екологічна оцінка (CEO), оцінка впливу на довкілля (ОВД), екологічне моделювання за сценаріями ризиків, цифрова сертифікація на відповідність міжнародним екологічним стандартам (наприклад, ISO 14001 або LEED). Такий підхід найчастіше впроваджується у великих будівельних компаніях, девелоперських структурах, що працюють із інституційними інвесторами, або в рамках державно-приватного партнерства, де питання екобезпеки є умовою участі в тендерах [2].

Інтегрована концепція передбачає, що інвайронментальна безпека не є окремою процедурою чи департаментом, а вбудовується в усі рівні управління та кожен етап проєкту. Тут використовуються інтегровані платформи (наприклад, BIM-системи з екологічними модулями), енергоефективні розрахунки, цифрове управління вуглецевим слідом, автоматизовані панелі KPI для оцінки екологічної ефективності в реальному часі. ESG-звітність у такому підході стає не звітною формальністю, а частиною корпоративної відповідальності [3]. Ця концепція особливо актуальна в умовах урбанізації, де важливо не лише збудувати об'єкт, а й інтегрувати його в міське середовище з мінімальним впливом на довкілля.

Реактивна концепція лишається актуальною для підприємств, які ще не пройшли повний шлях цифрової трансформації або функціонують у кризових умовах. Це підхід, що передбачає реагування на вже наявні інциденти — перевищення викидів, порушення санітарних вимог, скарги від місцевих жителів. Основні інструменти тут — моніторинг, ліквідація наслідків, коригувальні заходи, внутрішні розслідування. Попри свою обмеженість, реактивна концепція залишається важливою складовою загальної екологічної політики підприємства, особливо в частині роботи з репутаційними ризиками та підготовки антикризових планів [3].

Як системно узагальнено на рисунку 1, кожна з трьох концепцій інвайронментальної безпеки має свій фокус та інструментальний апарат, що визначає її застосування в будівельній практиці залежно від рівня цифрової зрілості підприємства.

Поступово формується усвідомлення того, що найефективнішою є гібридна модель, яка поєднує превентивний підхід на стратегічному рівні, інтегрований — на операційному, і реактивний — на рівні швидкого реагування. Така модель забезпечує максимальну адаптивність до змін зовнішнього середовища, нормативних оновлень та соціального контексту. Вона є основою для побудови цифрово-керованої системи інвайронментальної безпеки, яка дозволяє не лише відповідати поточним вимогам, а й формувати нові стандарти у сфері сталого будівництва [4].



Рис. 1. Концепції інвайронментальної безпеки в будівельному секторі: фокус, інструменти та логіка застосування
(розроблено автором на основі [3])

Таким чином, стратегічні імперативи екологічної безпеки у XXI столітті перетворюються на складну мультимірну матрицю рішень, де важливо не лише зменшити вплив, але й проактивно керувати ним через цифрові інструменти, ризикоорієнтовані платформи та інтегровані екологічні модулі. Саме така трансформація дозволить будівельним підприємствам не лише досягати відповідності, а й стати драйверами екологічної інновації, відповідального проектування та довготривалої соціальної довіри.

Методи та моделі стратегічного оцінювання екологічної безпеки будівельного підприємства перебувають у фазі глибокої трансформації, що зумовлено як зростанням регуляторного тиску, так і цифровими змінами в індустрії. У сучасному контексті стратегічного управління поняття екологічної безпеки виходить за межі виконання нормативів: воно охоплює здатність підприємства системно оцінювати вплив своєї діяльності на довкілля, прогнозувати ризики, адаптуватися до кліматичних та соціальних змін, забезпечуючи при цьому прозорість та інтегровану екологічну політику.

Одним із фундаментальних методів оцінювання екологічного впливу підприємств є екологічний аудит — стандартизована система перевірки відповідності діяльності вимогам природоохоронного законодавства. У будівельній галузі екологічний аудит охоплює контроль за викидами шкідливих речовин, водоспоживанням, рівнем шуму, рекультивацією порушених територій і впливом на природні ландшафти. З огляду на цифрову трансформацію, аудит дедалі частіше здійснюється із використанням цифрових шаблонів, сенсорного моніторингу,

автоматичної фото- і відеофіксації. Такий підхід значно скорочує час перевірки, знижує рівень суб'єктивізму та підвищує достовірність результатів. Основу цифрового аудиту формують стандарти ISO серій 14010–14012, а важливий внесок у дослідження цифрового екологічного моніторингу зробив німецький вчений Міхаель Браунгарт, який запропонував концепцію «від колиски до колиски» у межах екологічної сертифікації [5].

Наступним інструментом є SWOT-аналіз екологічної безпеки, який дозволяє ідентифікувати внутрішні сильні та слабкі сторони екологічної політики підприємства, а також зовнішні виклики і можливості. Наприклад, до сильних сторін може належати наявність сертифікатів ISO 14001, розвинені внутрішні системи контролю, тоді як до слабких — відсутність залучення громадськості або використання застарілих рішень. Серед зовнішніх загроз — зміни кліматичного регулювання, зростання вимог інвесторів, громадські протести. Метод активно використовується у дослідженнях Ганса Карлссона (Швеція) та Андреа Бьорна, які аналізують стратегічні підходи до адаптивної екологічної політики в будівництві [6].

Третій метод — екоскоуметрія, що полягає у формуванні багатофакторної моделі оцінки впливу за екологічними параметрами: рівень шуму, вібрації, забруднення, витрати енергії, частка повторного використання матеріалів. Кожен параметр має ваговий коефіцієнт, а результатом є інтегральний індекс екологічного ризику, який дає змогу локалізувати критичні точки впливу проекту на навколишнє середовище. Метод екоскоуметрії успішно поєднується з KPI-метриками, що дозволяє інтегрувати результати у системи управлінської аналітики. Подібні дослідження активно проводять Герман Штройберг (Німеччина) та Ева Хенріксон (Данія), які демонструють ефективність поєднання з цифровими інтерфейсами Power BI, ArcGIS для управління ризиками [7].

Один із найглибших у стратегічному плані методів — це LCA-аналіз (оцінка життєвого циклу, англ. Life Cycle Assessment). Він враховує всі етапи життєвого циклу будівельного об'єкта — від видобутку сировини до утилізації. У межах будівництва це включає вибір матеріалів, енергоефективність, транспортні витрати, експлуатаційні характеристики, рекультивацію. Використання LCA дозволяє оцінити вуглецевий слід, порівняти конструктивні альтернативи і адаптувати проект під екологічні сертифікації (LEED, BREEAM). Відомими дослідниками цього підходу є Манфред А. Хаушильд (Technical University of Denmark) і Марк Гейджс Хейбрехтс (Radboud University), які розробили методологічну базу LCA для сфери будівництва [8].

Важливу роль у цифровій трансформації екологічного управління відіграють KPI-індикатори екологічної безпеки. Це кількісні метрики, які будівельна компанія може використовувати для оперативного моніторингу й адаптації до змін екологічного середовища. До таких KPI належать: викиди CO₂ на квадратний метр забудови, частка вторинних матеріалів, рівень шумового навантаження, кількість екологічних

інцидентів, середній час реагування на порушення. Усі ці показники фіксуються в реальному часі через IoT-пристрої, сенсори викидів, дрони, відеонагляд. Останні дослідження Бадера Режеба (University of Sharjah, UAE) демонструють ефективність застосування цифрових близнюків (digital twins) у системах екологічного моніторингу будівництва [9].

Запровадження таких інструментів у цифровому середовищі формує нову парадигму управління — інтелектуальну екологічну систему, яка здатна не лише оцінювати відповідність, а й формувати екостратегію, що ґрунтується на аналізі даних у реальному часі. Завдяки цифровим дашбордам, підприємство може швидко і візуально відстежувати відхилення від заданих екологічних параметрів і вживати коригувальних дій.

У контексті переходу до цифрової економіки та підвищеної уваги до сталого розвитку особливої актуальності набуває дослідження стратегічного оцінювання екологічної безпеки. Для будівельних підприємств, що оперують у багатокомпонентному середовищі регуляторних вимог, інвестиційної підзвітності та соціальних очікувань, екологічна безпека перестає бути лише нормативною вимогою — вона трансформується у стратегічний фактор довгострокової конкурентоспроможності. Водночас цифрові інструменти дозволяють радикально змінити підходи до аналізу, верифікації, прогнозування та управління впливами на довкілля. Саме в цій точці — на перетині стратегічного екологічного мислення та цифрової трансформації — і розташовується сучасна дослідницька повістка, яка активно формується провідними науковцями [10].

Основним методологічним ядром стратегічного оцінювання екологічної безпеки в будівельній сфері на сьогодні виступає LCA-аналіз (Life Cycle Assessment) — тобто оцінка впливу на довкілля протягом усього життєвого циклу будівлі, від добування ресурсів і транспортування матеріалів до експлуатації, ремонту та знесення об'єкта. Його використання дозволяє будівельним компаніям не лише дотримуватись екологічних стандартів, а й управляти ризиками, оптимізувати логістику, підбирати матеріали за критерієм екоефективності та будувати фінансово обґрунтовані моделі сталості.

Вагомий внесок у розвиток методологій LCA, а також їх цифрову адаптацію, зробили ряд дослідників, чия праця визнана на глобальному рівні. Міхаель З. Хаушильд, Марк А.Й. Хойбрехтс, Ральф К. Розенбаум і Генрік Венцель належать до науковців, які не лише заклали фундамент наукової теорії екологічного аналізу життєвого циклу, а й розробили моделі, здатні до практичного застосування в цифрових середовищах: у BIM-системах, цифрових дашбордах, віртуальних симуляторах матеріального потоку, а також у платформах аналізу токсичності, вуглецевого сліду й сталого дизайну.

Як узагальнено у таблиці 1, ці науковці представляють ключові напрями досліджень у сфері цифрової трансформації стратегічного

оцінювання екологічної безпеки та є основоположниками відповідних інструментів, моделей і методологій. Їхні напрацювання є релевантними для будівельної галузі, яка перебуває на етапі глибокої цифрової інтеграції у процеси стратегічного екологічного управління.

Таблиця 1

Провідні науковці у сфері стратегічного оцінювання екологічної безпеки та цифрової трансформації LCA-моделей (розроблено автором на основі [10])

Прізвище, Ім'я	Країна / Установа	Основна спеціалізація	Ключовий внесок / Напрямок досліджень
Міхаель З. Хаушильд [11]	Данія / Технічний університет Данії (DTU)	Оцінка впливу життєвого циклу (LCA), LCIA	Автор підходів до LCIA, співавтор книги <i>Life Cycle Impact Assessment</i> , провідний дослідник цифрової інтеграції LCA у стратегії підприємств
Марк А.Й. Хойбрехтс	Нідерланди / Університет Радбауд	Екологічні науки, LCIA, екомодельовання	Спеціаліст з методів оцінки впливу на довкілля, співавтор <i>Life Cycle Impact Assessment</i> , дослідник інтеграції екопоказників у цифрові моделі
Ральф К. Розенбаум [12]	Франція / Кафедра ELSA-PACT	Екологічне моделювання, токсикологія, соціальна оцінка LCA	Автор моделей USEtox, Impact 2002+, IMPACT World+, провідний експерт з мультикритеріальних оцінок у життєвому циклі
Генрік Венцель [13]	Данія / Південний Данський університет	Екодизайн, оцінка промислових продуктів, системний LCA	Автор методології EDIP, активний розробник екологічного моделювання для промислового виробництва, впровадження LCA в стратегічне планування

Таким чином, стратегічне оцінювання екологічної безпеки у сучасному будівельному підприємстві — це не просто перевірка, а безперервний процес аналізу, моделювання та ухвалення рішень, який здійснюється в цифровому форматі, синхронізується з усіма етапами проєкту та спрямований на формування довгострокової екологічної конкурентоспроможності.

Інтеграція ризикоорієнтованих підходів в оцінювання інвайронментальної безпеки будівельних підприємств є відповіддю на сучасні виклики, пов'язані з невизначеністю екологічного середовища, нестабільністю кліматичних умов, жорсткістю екологічного регулювання та підвищеним рівнем соціального контролю. У таких умовах управління екологічними ризиками перестає бути факультативною функцією і перетворюється на невід'ємний компонент стратегічного планування і цифрового моніторингу виробничої діяльності. Це передбачає не лише реакцію на події, а й проактивне виявлення, аналіз та моделювання потенційних загроз [14].

Ключовим елементом ефективного екологічного ризик-менеджменту є класифікація ризиків за типами та джерелами. В умовах будівельного

середовища ризику поділяють на техногенні (наприклад, викиди, витоки, обвали), природні (землетруси, паводки, сильні вітри), соціальні (конфлікти з громадами, петиції), нормативні (посилення стандартів, нові вимоги до звітності) та репутаційні (зниження довіри, критика у медіа). Окрім цього, слід враховувати їх рівень імовірності та ступінь впливу, що дозволяє визначити пріоритети для реагування та формування профілактичних заходів.

Інструментарій для оцінювання екологічних ризиків охоплює як класичні аналітичні моделі, так і сучасні цифрові рішення. Одним із найбільш вживаних є метод FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), що дає змогу аналізувати потенційні точки відмови в системі і спрогнозувати їхні наслідки для довкілля. Метод PESTLE дозволяє ідентифікувати зовнішні фактори ризику — політичні, економічні, соціальні, технологічні, юридичні та екологічні — які можуть впливати на безпеку будівництва [15]. SWIFT-аналіз (Structured What-If Technique) забезпечує швидку якісну оцінку на етапі прийняття рішень, коли час на повноцінний аналіз обмежено. Метод ризик-матриць (Risk Matrix) дозволяє візуалізувати рівні ризику за шкалами імовірності та тяжкості наслідків, формуючи основу для побудови карти ризиків [16].

Як систематизовано на рисунку 2, кожен із сучасних інструментів оцінювання екологічних ризиків має чітке функціональне призначення та логіку взаємозв'язку з іншими елементами цифрової системи управління.



Рис. 2. Інструменти оцінювання екологічних ризиків у вигляді схеми (розроблено автором на основі [15, 16])

Зокрема, FMEA фокусується на превентивному аналізі можливих відмов; PESTLE дозволяє ідентифікувати зовнішні фактори ризику, що мають макрорівневу природу; SWIFT застосовується для оцінки альтернативних сценаріїв у швидкому форматі; ризик-матриця забезпечує структуровану візуалізацію рівнів небезпеки залежно від ймовірності та впливу. Усі ці інструменти можуть бути інтегровані у цифрові дашборди, які, у свою чергу, забезпечують моніторинг ризиків у режимі реального

часу та формування автоматизованих рішень у відповідь на виявлені загрози. Така взаємопов'язана архітектура формує основу для адаптивної цифрової платформи ризик-менеджменту екологічної безпеки в будівельному середовищі.

У сучасній науковій літературі існує низка провідних дослідників, які зробили значний внесок у формування архітектури цифрового інструментарію для оцінювання інвайронментальної безпеки, зокрема в контексті інтеграції сенсорних технологій, аналітичних платформ та екологічної звітності. Їхні роботи є науковим підґрунтям для розробки інтегрованих систем цифрового екоконтролю в будівельній галузі.

Одним із найвідоміших є Альфонсо Аренас Маркес, який у своїх дослідженнях аналізує застосування IoT та сенсорних мереж для моніторингу довкілля на інфраструктурних об'єктах. Його роботи охоплюють інтеграцію датчиків якості повітря, шуму та вологості в загальну архітектуру управління проектом через цифрову обробку даних. Він доводить, що застосування IoT-систем у будівництві суттєво підвищує ефективність реагування на ризики довкілля й дає змогу створювати превентивні сценарії на основі аналізу історичних трендів [17].

У напрямі аналітичних платформ одним із ключових дослідників є Васукі Наїду, який спеціалізується на цифровій візуалізації екологічних показників через Power BI та інтеграцію цієї аналітики з системами ESG-звітності. Він досліджує, як автоматизація побудови KPI-дошок і сповіщень може забезпечити сталу екологічну динаміку проекту, навіть у складному урбаністичному середовищі. Його роботи містять приклади налаштування інтерактивних панелей в рамках будівництва «зелених» бізнес-центрів у Сінгапурі, де використовувалися понад 50 показників у режимі реального часу [18].

Суттєвий внесок також зробили Френсіс Ліу та Клайв Стівенс, які досліджували застосування екологічних систем у містах, зокрема в проектах моніторингу якості повітря, шуму та вібрацій у будівництві метрополітенів [19]. Їхній підхід ґрунтується на поєднанні геоінформаційних систем (GIS) та автоматичного звітування на основі заздалегідь визначених тригерів. У спільному дослідженні, опублікованому в Journal of Environmental Informatics, вони представили модель інтеграції сенсорних платформ у міську цифрову інфраструктуру управління будівельними ризиками.

Також варто згадати Дірка Більбао, який вивчав ESG-панелі та автоматизоване звітування для будівельних компаній, що прагнуть відповідати стандартам фінансової прозорості та екологічної відповідальності. Він розробив фреймворк для поєднання даних з Power BI, SAP, Excel API та відкритих реєстрів ESG, який широко впроваджується у девелоперських проектах у Північній Європі [20].

Загалом, праці зазначених авторів створюють міцну методологічну базу для формування архітектури цифрових систем оцінювання

інвайронментальної безпеки. Їхні підходи доводять, що ефективна цифрова інфраструктура базується на поєднанні сенсорного середовища, геоаналітики, інтерактивної візуалізації та автоматичного екологічного звітування. Як відображено на рисунку 3, саме така багаторівнева інтеграція формує сучасну модель екологічного управління, яка є адаптивною, доказовою та прозорою.



Рис. 3. Архітектура цифрового інструментарію оцінювання інвайронментальної безпеки будівельного підприємства
(розроблено автором на основі [21])

У процесі стратегічного оцінювання рівня інвайронментальної безпеки будівельного підприємства надзвичайно важливо враховувати не лише екологічні характеристики об'єкта чи процесу, а й комплекс взаємопов'язаних факторів, які впливають на остаточний рівень екологічної відповідальності організації. Такий підхід потребує багатофакторного аналізу, що поєднує екологічну, операційну, інвестиційну, регуляторну та інституційну складові в єдину методологічну рамку.

Методологія стратегічного оцінювання вимагає ідентифікації не тільки ризиків забруднення, а й здатності підприємства відповідати нормам екологічного права, фінансовій прозорості у сфері сталого розвитку, публічним очікуванням і стандартам соціально-екологічної звітності. У цифровому середовищі, де аналітичні дані інтегруються в системи управління (ERP, BIM, ESG-дашборди), методологія має будуватися на цифрових каналах моніторингу, автоматичній аналітиці, динамічних KPI та стандартизованій звітності [22].

Цифрові сенсори забезпечують безперервний збір первинних екологічних даних, які інтегруються в хмарні платформи для формування KPI-індикаторів. Надалі ці індикатори використовуються не лише для оцінки екологічного стану, а й для прийняття стратегічних рішень у рамках фінансового планування, оцінки інвестиційної привабливості,

аналізу відповідності регуляторним нормам або підготовки до ESG-рейтингу. Саме на основі поєднання таких факторів формується інтегрований індекс інвайронментальної безпеки, який відповідає вимогам сучасної нормативно-цифрової реальності.

Нижче представлена структурована таблиця 2, яка дозволяє систематизувати основні фактори стратегічного оцінювання, типові індикатори безпеки та цифрові інструменти, що застосовуються у сучасній будівельній практиці.

Таблиця 2.

Фактори стратегічного оцінювання інвайронментальної безпеки будівельного підприємства (розроблено автором на основі [22])

Категорія факторів	Типові індикатори безпеки	Методи моніторингу / цифрові інструменти
Екологічні (довкілля)	CO ₂ -викиди, якість повітря, шумове навантаження, використання ресурсів, результати LCA-аналізу	Сенсори, цифрові двійники, геоаналітика
Операційні (виробництво)	Енергоефективність, частка перероблених матеріалів, кількість екологічних інцидентів	KPI-панелі, Power BI, SCADA-системи
Інвестиційні (фінанси)	Індекс екологічного ризику, ROI сталих технологій, інтеграція екології в фінансове планування	BI-аналітика, інвестиційні еко-звіти
Регуляторні (нормативна база)	Відповідність стандартам ISO 14001, LEED, частота перевірок, кількість виявлених порушень	Шаблони звітності, автоматизоване подання даних, API-зв'язки
Інституційні (ESG/стандарти)	Наявність публічної ESG-панелі, відкритість екологічних звітів, виконання зелених зобов'язань	ESG-дашборди, цифрові модулі, автоматизовані індикатори в Power BI

Як видно з таблиці, стратегічна оцінка інвайронментальної безпеки не обмежується екологічними даними — вона охоплює весь операційно-інституційний контекст, в якому функціонує будівельне підприємство. Такий багатовимірний підхід дозволяє здійснювати об'єктивну та верифіковану оцінку безпеки з урахуванням сучасних вимог ESG, green compliance та державного нагляду, підвищуючи інституційну довіру та знижуючи ризики в реалізації інфраструктурних проєктів.

Системне опрацювання тематики цифрової трансформації стратегічного оцінювання інвайронментальної безпеки дозволяє виокремити ключові елементи та міжфакторні зв'язки, які визначають нову архітектуру управління екологічною відповідальністю будівельного підприємства. У сучасних умовах цифровізації галузі, посилення екологічного нагляду та зростання ваги ESG-критеріїв інвайронментальна безпека виходить за межі суто природоохоронної функції та перетворюється на багатоаспектну управлінську категорію, що включає елементи ризик-менеджменту, стратегічної аналітики, фінансової відкритості та нормативної відповідності.

Важливою частиною стратегії є інтеграція ризикоорієнтованих підходів, що дозволяє ідентифікувати критичні екологічні ризики, класифікувати їх за джерелами, масштабом і ймовірністю, і відповідно – інтегрувати результати аналізу в архітектуру управлінських рішень. FMEA, PESTLE, ризик-матриці, біоіндикатори і цифрові дашборди формують той функціональний каркас, що забезпечує проактивну і прозору модель екологічного контролю. Завдяки цьому ризик-менеджмент перетворюється на системну аналітичну функцію, вбудовану у процес управління якістю, операційною ефективністю та екологічною відповідальністю.

Ключовим висновком є також те, що архітектура цифрового інструментарію не є статичною — вона базується на інтеграції різнорівневих компонентів: сенсорного шару (моніторинг у реальному часі), аналітичного шару (KPI-панелі, BI-аналітика), стратегічного шару (модулі автоматичної звітності, ESG-панелі) та зовнішніх стандартів (LEED, ISO, державні реєстри). Ця система дозволяє будівельному підприємству адаптуватися до викликів ESG, green compliance та міжнародного аудиту сталості.

Зрештою, сформульована методологія стратегічного оцінювання базується на системному підході, в якому екологічні, операційні, інвестиційні, регуляторні та інституційні фактори об'єднуються в єдиний контекст оцінювання. Це забезпечує не лише багатовимірну оцінку стану інвайронментальної безпеки, а й формує цифрову культуру відповідальності, прозорості та сталого управління, що є критично важливою передумовою функціонування будівельного підприємства в умовах нової економіки, орієнтованої на стійкий розвиток і цифрову відповідальність.

Висновок Проведене дослідження дає змогу зробити висновок, що стратегічне оцінювання рівня інвайронментальної безпеки будівельних підприємств у цифровому та ризикоорієнтованому контексті набуває вирішального значення у сучасних умовах трансформації будівельної галузі. Традиційні підходи, орієнтовані на контроль екологічних стандартів та виконання нормативів, уже не здатні повною мірою забезпечити комплексну безпеку, оскільки вони не враховують динаміку ризиків, пов'язаних із нестабільністю зовнішнього середовища, цифровізацією економіки та зростанням вимог до сталого розвитку. У цьому контексті визначальним є формування інструментарію, який інтегрує аналітику великих даних, інноваційні методи прогнозування та системи ризик-менеджменту у єдину стратегічну модель. Результати роботи засвідчили, що впровадження цифрових платформ управління ресурсами, використання BIM-технологій та аналітичних систем моніторингу дозволяють здійснювати оцінку інвайронментальної безпеки не лише постфактум, а й у режимі прогнозування. Це забезпечує своєчасне виявлення відхилень та потенційних ризиків, що знижує ймовірність негативних наслідків для довкілля та виробничих процесів.

References

1. ISO 14001:2015 – Environmental Management Systems [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iso.org/standard/60857.html>.
2. LEED – Leadership in Energy and Environmental Design [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.usgbc.org/leed>.
3. Integration of BIM and LCA for Sustainable Construction. URL: <https://www.pbctoday.co.uk/news/digital-construction-news/bim-news/bim-lca-integration-the-future-of-sustainable-construction/148272/>.
4. Aslam, S. What is Active and Reactive Monitoring? [Electronic resource]. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/what-active-reactive-monitoring-sheraz-aslam>.
5. Krasnianskyi, M. Yu. Ecological Safety: textbook. – Kyiv: Kondor, 2024. – 180 p. URL:: <https://condor-books.com.ua/pryrodnycha-literatura/ekolohichna-bezpeka-navchalnyy-posibnyk>.
6. Braungart, M., & McDonough, W. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. – North Point Press, 2002.
7. Karlsson, H., Björn, A. Environmental Management in Construction Projects^ A Strategic Approach. Journal of Cleaner Production, 2018. Vol. 172. pp. 2819–2828.
8. Stroiberg, H., & Henriksson, E. Multimetric Assessment in Sustainable Urban Planning. Environmental Impact Assessment Review, 2020. Vol. 83. Article 106389.
9. Hauschild, M.Z., & Huijbregts, M. Life Cycle Impact Assessment. – Springer, 2015.
10. Rejeb, A. Digital Twin in Construction: Applications and Challenges. – Journal of Building Engineering, 2022. – Vol. 47. – Article 103919.
11. Hauschild, M.Z., & Huijbregts, M.A.J. (Eds.). Life Cycle Impact Assessment. Springer Science+Business Media, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9744-3>.
12. Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., ... & Hauschild, M.Z. (2008). USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. – The International Journal of Life Cycle Assessment, 13(7), 532–546. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>.
13. Wenzel, H., Hauschild, M.Z., & Alting, L. Environmental Assessment of Products. Volume 1: Methodology, Tools and Case Studies in Product Development. – Chapman & Hall, 1997.
14. Saputra, P.D., Fansuri, M.H., Laksmi, A.A., Ragil, M., & Simbolon, M.N.B. Construction Safety Risk Assessment for Underground Structures in Military Hospital Projects Using Activity-Based Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) URL:: <https://www.mdpi.com/2673-4591/84/1/33>.
15. PESTLE Analysis of the Construction Industry URL:: <https://pestleanalysis.com/construction-industry-pestle-analysis/>.

16. Introducing the SWIFT Tool for Environmental Assessment and Risk Screening for Rural Water Supplies URL: <https://policy-practice.oxfam.org/resources/introducing-the-swift-tool-for-environmental-assessment-and-risk-screening-for-582298/>.
17. Márquez, A.A., & Rodriguez, M.D. IoT-based smart environmental monitoring system: architecture, design and implementation. – Sensors, 2020. – Vol. 20, No. 24. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/24/7264>.
18. Lowe, B., D'Alessandro, S., & Winzar, H. Social and Sustainability Marketing: A Casebook for Reaching Your Socially Responsible Consumers through Marketing Science. – eBook. – Springer Nature, 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340807298_Social_and_Sustainability_Marketing_A_Casebook_for_Reaching_Your_Socially_Responsible_Consumers_through_Marketing_Science;
19. Shpakova, H., Chupryna, Yu., ... Plys, N. Tools for assessing the competitiveness of a construction company as a contractor in public-private partnership projects. – 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), Astana, Kazakhstan, 2024, pp. 473–481. doi: 10.1109/SIST61555.2024.10629561.
20. SAP Academic Community Conference 2022 DACH. Proceedings of the SAP Academic Community Conference 2022 DACH URL:: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1685828/1685828.pdf>.
21. Klymchuk, M.M. “Environmental Economics” – a modern concept of energy-saving management in enterprises URL:: <https://ev.fmm.kpi.ua/article/download/108707/103655/230585>.
22. Chupryna, Kh., Chupryna, Yu., Pereli, D., ..., M., & Van, Yu. (2024). Conceptualization of the digital ecosystem of the construction industry: an analytical model of managerial decision-making in a complex environment. Management of Development of Complex Systems, (60), 209–220.

O.M. Malykhina, I.L. Fedun, D.M. Nikolayko, A.S. Movsesyan, A.G. Lytarev

Toolkit for strategic assessment of the level of environmental safety of construction enterprises in a digital and risk-oriented context

This paper examines the toolkit for the strategic assessment of the level of environmental safety of construction enterprises in a digital and risk-oriented context. It emphasizes that under current global transformations, the environmental aspects of the construction industry are becoming no less important than economic or technological ones. Modern enterprises are forced to adapt to the strengthening of environmental requirements, increasing social pressure, and the necessity of minimizing risks that arise in the production process. The use of digital technologies, such as environmental impact monitoring systems, risk management platforms, and analytical tools, makes it possible to create more accurate and comprehensive models for assessing environmental safety.

Special attention is paid to the analysis of risk-oriented approaches, which allow integrating the results of strategic assessment into managerial decision-making. This ensures the ability to forecast probable scenarios of the environmental impact of construction enterprises and to develop strategies for preventing and minimizing ecological threats. An important component is the assessment of the enterprise's resource base, which includes technological, financial, and human resources that form the potential for improving the level of environmental safety.

The study also highlights the role of BIM technologies, artificial intelligence systems, and big data in forming transparent and adaptive mechanisms of environmental control. This makes it possible to increase the accuracy of environmental forecasts, the speed of information processing, and the efficiency of managerial decisions. The concept of integrating digital management platforms with environmental management systems is considered as a means of ensuring the sustainability of enterprises in the long-term perspective.

The obtained results lead to the conclusion that strategic assessment of the level of environmental safety is an essential component of the modern management model of a construction enterprise. The use of digital technologies and risk-oriented methods enables the formation of a systematic approach that ensures a balance between economic efficiency and environmental responsibility. The proposed toolkit can be used as a theoretical basis for further research and practical developments, as well as a methodological guideline for managers seeking to ensure competitiveness in today's dynamic market environment.

Keywords: *environmental safety, economic security, security determinants, threats, construction enterprises, digital technologies, risk-oriented approach, strategic assessment, environmental management, BIM technologies, risk management.*

Посилання на статтю:

АРА: Malykhina O.M., Fedun I.L., Nikolayko D.M., Movsesyan A.S., Lytarev A.G. (2024). Instrumentariy stratehichnoho otsinyuvannya rivnya invayronmental'noyi bezpeky budivel'nykh pidpryyemstv u tsyfrovomu ta ryzykoooriyentovanomu konteksti. [Toolkit for strategic assessment of the level of environmental safety of construction enterprises in a digital and risk-oriented context]. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 54(2), С. 76-91

ДСТУ: Малихіна О.М., Федун І.Л., Ніколайко Д.М., Мовсесян А.С., Литарев О.Г. Інструментарій стратегічного оцінювання рівня інвайронментальної безпеки будівельних підприємств у цифровому та ризикоорієнтованому контексті. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2024. № 54 (2). С. 76-91.