

УДК 502.131.1:622.271:656.13

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-11>

Людмила ГЕРАСИМЧУК

кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0002-3166-5588

Ніна КИРИЛЕНКО

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0001-7222-9320

Руслана ВАЛЕРКО

доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0003-4716-0100

Ірина ПАЦЕВА

доктор технічних наук, професор кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0001-6271-7355

Бібліографічний опис статті: Герасимчук, Л., Кириленко, Н., Валерко, Р., Пацева, І. (2025). Інтеграція ESG-критеріїв та екологічних стандартів ЄС у системах управління кар'єрним транспортом. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 4, 90–97, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-11>

ІНТЕГРАЦІЯ ESG-КРИТЕРІЇВ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ СТАНДАРТІВ ЄС У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ КАР'ЄРНИМ ТРАНСПОРТОМ

Метою дослідження є визначення та обґрунтування підходів до інтеграції ESG-критеріїв, екологічних стандартів ЄС та цифрових інструментів регулювання у систему управління внутрішньокар'єрним транспортом з метою підвищення екологічної ефективності, прозорості та відповідності принципам сталого видобутку.

Методологія. У дослідженні застосовано комплексний підхід, що поєднує аналіз екологічних та правових стандартів ЄС, принципів ESG-комплаєнсу та цифрових інструментів екологічного регулювання. Для оцінки впливів і ефективності транспортних процесів використано моделі прогнозування витрат пального та викидів, побудовані на методах машинного навчання. Проведено сценарний аналіз екологічних та технологічних рішень, а також оцінено можливість інтеграції цифрових систем e-permitting, INSPIRE та one-stop-shop у практики екологічного управління гірничих підприємств.

Наукова новизна полягає у розробленні та обґрунтуванні інтегрованого підходу до управління внутрішньокар'єрними транспортними процесами, який поєднує вимоги екологічних стандартів ЄС, ESG-критерії та цифрові технології. Запропоновано модель оцінювання екологічної ефективності на основі прогнозних цифрових інструментів (ML-моделі, Digital Twin, IoT-моніторинг) та визначено можливості впровадження європейських систем e-permitting, INSPIRE і one-stop-shop у практики сталого видобутку.

Висновки. Проведене дослідження узагальнило підходи до інтеграції екологічних стандартів ЄС, ESG-критеріїв та цифрових технологій у систему управління внутрішньокар'єрним транспортом. Сталій видобуток вимагає поєднання правових, управлінських та цифрових інструментів, які забезпечують прозорість, екологічну ефективність і відповідальність виробництва. Стандарти ЄС (IED, EU Taxonomy, Green Deal) визначають

рамки для зменшення викидів і підвищення енергоефективності, а ESG-критерії – комплексну оцінку екологічних, соціальних та управлінських аспектів діяльності. Цифрові моделі, аналітика, IoT-моніторинг і технологія Digital Twin дають змогу точно оцінювати впливи, оптимізувати логістику та зменшувати навантаження на довкілля. Європейські інструменти регулювання (e-permitting, INSPIRE, one-stop-shop) підсилюють прозорість і сприяють гармонізації практик із правом ЄС. Синергія цих рішень формує цілісну модель сталого видобутку та підтримує інтеграцію України в європейський екологічний простір.

Ключові слова: ESG-комплаєнс, сталий видобуток, екологічні стандарти ЄС, EU Taxonomy, екологічне управління, цифрові технології, внутрішньокар'єрний транспорт, Digital Twin, IoT-моніторинг, e-permitting, INSPIRE, one-stop-shop, зелена трансформація, гармонізація регулювання, корпоративна відповідальність.

Liudmyla HERASYMCHUK

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Protection Processes, State University «Zhytomyr Polytechnic», 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0002-3166-5588

Nina KYRYLENKO

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Ecology and Environmental Protection Processes, State University «Zhytomyr Polytechnic», 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0001-7222-9320

Ruslana VALERKO

Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Department of Ecology and Environmental Protection Processes, State University «Zhytomyr Polytechnic», 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0003-4716-0100

Iryna PATSEVA

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Ecology and Environmental Protection Processes, State University «Zhytomyr Polytechnic», 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0001-6271-7355

To cite this article: Herasymchuk, L., Krylenko, N., Valerko, R., Patseva, I. (2025). Intehratsiia ESG-kryteriiv ta ekolohichnykh standartiv YeS u systemakh upravlinnia kariernym transportom [Integration of ESG Criteria and EU Environmental Standards into In-Pit Transport Management Systems]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 4, 90–97, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-11>

INTEGRATION OF ESG CRITERIA AND EU ENVIRONMENTAL STANDARDS INTO IN-PIT TRANSPORT MANAGEMENT SYSTEMS

The purpose of the study to identify and substantiate approaches to integrating ESG criteria, EU environmental standards, and digital regulatory instruments into the management system of in-pit transportation in order to improve environmental performance, transparency, and compliance with the principles of sustainable mining.

Methodology. The study applies a comprehensive approach that combines the analysis of EU environmental and legal standards, ESG-compliance principles, and digital tools of environmental regulation. Fuel consumption and emission forecasting models based on machine learning methods were used to assess the environmental impacts and efficiency of transport processes. Scenario analysis of environmental and technological solutions was conducted, and the potential for integrating digital systems such as e-permitting, INSPIRE, and one-stop-shop portals into environmental management practices of mining enterprises was evaluated.

The scientific novelty consists in the development and substantiation of an integrated approach to managing in-pit transport operations that brings together the requirements of EU environmental standards, ESG criteria, and digital technologies. A model for assessing environmental efficiency based on predictive digital tools (ML models, Digital Twin, IoT monitoring) is proposed, along with the identification of opportunities for implementing European systems such as e-permitting, INSPIRE, and one-stop-shop in sustainable mining practices.

Conclusions. The study summarizes approaches to integrating EU environmental standards, ESG criteria, and digital technologies into the management of in-pit transportation. Sustainable mining requires the combined use of legal,

managerial, and digital instruments that ensure transparency, environmental efficiency, and corporate responsibility. EU standards (IED, EU Taxonomy, Green Deal) provide a framework for reducing emissions and improving energy efficiency, while ESG criteria support comprehensive assessment of environmental, social, and governance aspects. Digital models, analytics, IoT monitoring, and Digital Twin technology enable accurate impact assessment, logistical optimization, and reduced environmental pressures. European regulatory tools (e-permitting, INSPIRE, one-stop-shop) enhance transparency and support the harmonization of national practices with EU law. The synergy of these solutions shapes a coherent model of sustainable mining and promotes Ukraine's integration into the European environmental framework.

Keywords: *ESG compliance, sustainable mining, EU environmental standards, EU Taxonomy, environmental management, digital technologies, in-pit transportation, Digital Twin, IoT monitoring, e-permitting, INSPIRE, one-stop-shop, green transition, regulatory harmonization, corporate responsibility.*

Актуальність проблеми. У сучасних умовах трансформації світових підходів до видобування корисних копалин гірничодобувна галузь України опинилася в центрі змін, зумовлених впливом екологічних, правових, економічних та технологічних чинників. Поглиблення євроінтеграційних процесів, зростання вимог до екологічної відповідальності бізнесу, а також перехід до політики декарбонізації відповідно до Європейського зеленого курсу (EU Green Deal) формують нові рамкові орієнтири для розвитку видобувного сектору. Одним з ключових напрямів цієї трансформації є інтеграція ESG-критеріїв, сучасних стандартів екологічного управління та правових вимог Європейського Союзу у виробничі процеси гірничих підприємств.

Особливого значення набуває сфера внутрішньокар'єрних транспортних операцій, які традиційно формують найбільшу частку енергоспоживання, викидів та визначають рівень техногенного навантаження на довкілля. Транспортні процеси у кар'єрах характеризуються складними умовами експлуатації – значними ухилами доріг, простоями, високою питомою витратою дизельного палива та відсутністю систематизованого цифрового контролю, що робить їх одним з ключових об'єктів екологічного управління та модернізації відповідно до вимог директиви про промислові викиди (IED), Таксономії ЄС, концепції зеленого гірництва та принципів сталого видобутку.

Паралельно з підвищенням екологічних вимог у ЄС активно розвиваються цифрові інструменти регулювання – e-permitting, INSPIRE, цифрові геопортали та моделі «one-stop-shop», які забезпечують автоматизацію процедур екологічного дозволу, прозорість і контроль достовірності даних, зниження корупційних ризиків та інтеграцію екологічних показників у систему управління. Для України впровадження таких підходів має особливе

значення, оскільки дозволяє гармонізувати національні механізми контролю з практиками держав-членів ЄС, підвищити інвестиційну привабливість видобувного сектору та забезпечити прогрес у виконанні міжнародних екологічних зобов'язань.

Зростає роль й сучасних цифрових технологій – IoT-сенсорів, цифрових двійників, машинного навчання та платформізованої логістики, які забезпечують можливість точного прогнозування витрат пального, екологічних ризиків та викидів, а також дозволяють оперативно оптимізувати маршрути, навантаження техніки та режими роботи машин. Інтеграція таких моделей у межах ESG-комплаєнсу створює нову якість управління кар'єрним транспортом, забезпечуючи економічний ефект і відповідність екологічним стандартам.

Отже, актуальність дослідження зумовлена необхідністю: адаптації української гірничої галузі до правових норм та екологічних політик ЄС; впровадження цифрових інструментів, що забезпечують прозорість та ефективність екологічного регулювання; модернізації транспортних процесів на основі ESG-критеріїв і принципів сталого видобутку; переходу до моделей «зеленого гірництва», які поєднують цифровізацію, енергоефективність та корпоративну екологічну відповідальність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світові тенденції розвитку видобувної промисловості орієнтуються на зниження вуглецевого сліду, ресурсоефективність та прозорість екологічних даних, що визначає перехід індустрії природного каменю до концепції «зеленого гірництва» та впровадження інструментів ESG-комплаєнсу відповідно до вимог права ЄС. Глобальна динаміка ринку природного каменю демонструє зростання попиту й посилення екологічних викликів (Montani, 2022). У дослідженнях українського сектору підкреслюються його ресурсний потенціал, технологічні обмеження,

дисбаланс між видобутком і переробкою, інвестиційні ризики (Filipova & Rasputna, 2018; Saik et al., 2023; Panteleeva et al., 2022; Mykhailov, 2024; Герасимчук та ін., 2025) та проблеми раціонального використання родовищ і вплив гірничих робіт на довкілля (Gavrilyuk et al., 2024; Panteleeva et al., 2022).

Науковці акцентують на потребі модернізації камінеобробної галузі, впровадженні енергоефективних рішень та підвищенні керованості процесів (Saik et al., 2023; Герасимчук та ін., 2025), що узгоджується з європейськими стратегіями декарбонізації та екологічного менеджменту. Міжнародні дослідження підтверджують, що видобувна промисловість є суттєвим джерелом викидів парникових газів, а прозора й деталізована інвентаризація викидів – необхідна умова для формування кліматичної політики, інвестиційної оцінки та відповідності Таксономії ЄС (Zheng et al., 2023; Azadi et al., 2020).

Значну частину робіт присвячено й оптимізації транспортних процесів у кар'єрах із використанням стохастичних, математичних та імітаційних моделей, спрямованих на підвищення енергоефективності та скорочення викидів (Alarie & Gamache, 2002; Ashtiani et al., 2024). Паралельно розробляються рішення на основі дистанційного зондування, ГІС та DSS для моніторингу стану кар'єрних територій (Licciardello et al., 2022). Значна увага приділяється також дослідженню реальних профілів роботи дизельної техніки, фактичних витрат палива та емісій, що підвищує точність моделювання та інвентаризації (Sandhu et al., 2016; Vanasiewicz et al., 2023; Liao et al., 2022). Зазначене формує наукове підґрунтя для впровадження жорсткіших екологічних стандартів і технічних рішень для зменшення забруднення.

В літературі розглядаються економіко-правові аспекти регулювання викидів. Методики екологічного оподаткування, зокрема розрахунку екоподатку за спалювання палива, створюють фінансові стимули для зниження ПММ-споживання та викидів, що корелює з вимогами Директиви про промислові викиди та інструментами регулювання промислового забруднення в ЄС.

Попри значний прогрес у дослідженні декарбонізації видобутку, оптимізації логістики, удосконаленні інвентаризації викидів та прозорості даних, недостатньо вивченими залишаються

питання інтеграції цифрових моделей управління кар'єрним транспортом із вимогами європейського права та ESG-комплаєнсу, потенціал застосування e-permitting, INSPIRE та one-stop-shop-порталів у гірничому секторі, а також гармонізація національного регулювання з Таксономією ЄС і механізмами «зеленого» фінансування.

Мета дослідження – визначення та обґрунтування підходів до інтеграції ESG-критеріїв, екологічних стандартів ЄС та цифрових інструментів регулювання у систему управління внутрішньокар'єрним транспортом з метою підвищення екологічної ефективності, прозорості та відповідності принципам сталого видобутку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для узагальнення ключових напрямів екологічної та цифрової трансформації гірничої галузі сформовано концептуальну схему, що відображає основні елементи сучасної моделі сталого видобутку (рис. 1). Наведена інтегрована модель сталого видобутку, яка поєднує екологічні стандарти ЄС, ESG-критерії та сучасні цифрові технології, що демонструє ключові компоненти екологічно відповідного управління гірничими процесами, включно з цифровими моделями, IoT-моніторингом, Digital Twin та європейськими інструментами екологічного регулювання.

1. Нормативно-правові засади інтеграції екологічних стандартів ЄС у гірничу галузь. Європейський Союз поступово переходить до жорсткіших моделей екологічного регулювання промисловості, у центрі яких – Директива про промислові викиди (IED), Регламент про Таксономію ЄС, Європейський зелений курс, а також вимоги до нефінансової звітності в межах ESG-комплаєнсу. Для гірничої промисловості ці документи встановлюють стандарти зниження викидів, застосування кращих доступних технологій (BAT), обов'язкового моніторингу, цифрової фіксації екологічних даних та циркулярного підходу до управління ресурсами.

У сфері транспортних процесів ці документи зобов'язують підприємства контролювати викиди CO₂, NO_x, SO₂ та твердих частинок, оптимізувати використання дизпалива, забезпечувати вимірюваність і трасованість інтенсивності викидів, використовувати цифрові інструменти доступу до моніторингових

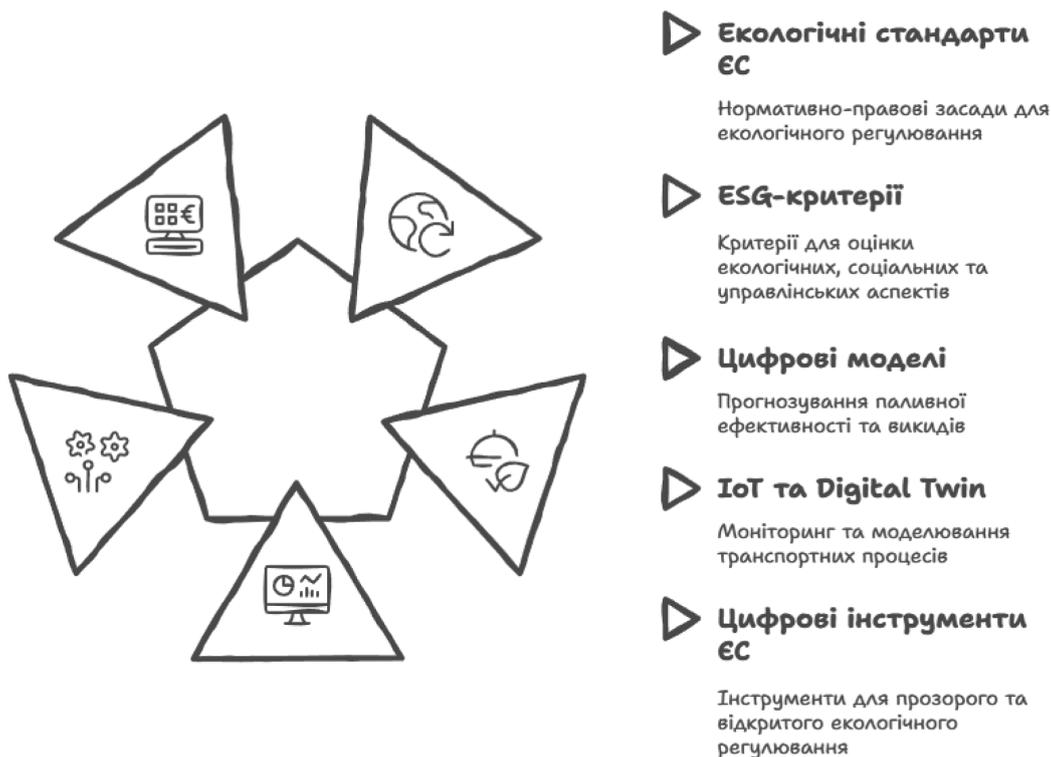


Рис. 1. Інтегрована модель сталого видобутку на основі екологічних стандартів ЄС, ESG-критеріїв та цифрових інструментів управління

даних, впроваджувати механізми корпоративної екологічної відповідальності. Гармонізація українського гірничого законодавства з правом ЄС передбачає впровадження тих самих вимог, а отже, адаптація екологічно вразливих процесів, зокрема кар'єрної логістики, є стратегічно важливим кроком для долучення до єдиного європейського ринку.

2. *Роль ESG-критеріїв у модернізації транспортних процесів кар'єрів.* ESG-комплаєнс розглядає діяльність підприємства з трьох позицій:

- Environmental (E) – мінімізація викидів, відповідальне користування паливом, управління ризиками;
- Social (S) – безпека праці, зниження ризиків для здоров'я від викидів та шуму, покращення умов праці машиністів та водіїв;
- Governance (G) – прозорість виробничих процесів, запобігання корупційним практикам у дозволах на розробку родовищ, контроль за достовірністю екологічних даних.

Управління кар'єрним транспортом має високий потенціал впливу саме на E-компонент, оскільки транспорт є основним джерелом забруднення в кар'єрах. Водночас цифровізація логістики істотно впливає й на G-компонент, забезпечуючи прозорість і контроль усіх

операцій, та на S-компонент, зменшуючи ризики для персоналу.

Запровадження ESG-критеріїв у транспортному сегменті дозволяє контролювати екологічні KPI (викиди, ПММ-ефективність), формувати відкриті екологічні звіти згідно з вимогами ЄС, оцінювати вплив кожного логістичного сценарію на сталий видобуток, узгоджувати виробничу політику з «кліматичними» інвестиційними вимогами.

3. *Цифрові моделі прогнозування паливної ефективності та викидів.* Управління кар'єрним транспортом традиційно ґрунтується на емпіричних спостереженнях і досвіді операторів. Проте сучасні підходи ЄС вимагають кількісної оцінки впливів та систематичного моніторингу.

Серед комплексу цифрових моделей, які дозволяють:

- 1) прогнозувати витрати пального з врахуванням ухилу та профілю доріг, маси та геометрії блоків, фактичних режимів роботи техніки, коефіцієнтів зчеплення, сезонних та кліматичних чинників. Алгоритми машинного навчання (Random Forest, регресійні моделі, нейромережі) забезпечують високу точність прогнозування і адаптивність до змінних виробничих умов;

2) оцінювати викиди CO₂, NO_x, SO₂ та PM з використанням емісійних коефіцієнтів, реальних циклів роботи техніки, методики Tier 3, розрахунків вуглецевої інтенсивності на одиницю перевезеного вантажу;

3) моделювати різні сценарії логістики (наприклад: маршрути з мінімальними ухилами, оптимізація швидкісних режимів, зменшення часу простою, перехід на альтернативні види палива (HVO), електрифікація окремих транспортних сегментів) з обґрунтуванням найбільш екологічно доцільних сценаріїв видобутку та транспортування, що повністю відповідає принципам сталого видобутку та EU Taxonomy.

4. *Інтеграція IoT, Digital Twin та візуалізації даних у систему екологічного управління.* Застосування IoT-сенсорів забезпечує автоматичний моніторинг фактичних витрат пального, навантаження на техніку, роботи двигунів, маршруту та швидкісних режимів, реальних викидів. Цифровий двійник (Digital Twin) дозволяє моделювати транспортні процеси у віртуальному середовищі, аналізувати наслідки змін конфігурації доріг, маршрутизації, складу техніки чи сезонних чинників. Зазначені інструменти забезпечують оперативність прийняття рішень, мінімізацію ризиків, суттєве зниження витрат пального, скорочення викидів, підвищення рівня корпоративного екологічного управління.

5. *Європейські цифрові інструменти екологічного регулювання та їх потенціал для України.* У країнах ЄС активно використовуються цифрові механізми, які роблять систему екологічного регулювання прозорою, відкритою та недискримінаційною. Серед ключових:

1) E-permitting (електронні ліцензії, дозволи), що автоматизує дороговартісні дозвільні процедури, має вбудований аналіз екологічних параметрів і наявність цифрової історії рішень та сприяє зниженню корупційних ризиків;

2) INSPIRE дає змогу інтегрувати геопросторові дані про кар'єри, маршрути техніки, зони екологічної чутливості, території, що підлягають охороні, а також дані моніторингу викидів;

3) One-stop-shop portals забезпечують єдине вікно для всіх екологічних процедур, інтеграцію ESG-звітності, ліцензій, дозволів, а також швидкий обмін даними з органами влади та інвесторами.

В цілому, інтеграція зазначених інструментів в Україні дозволить підвищити ефективність

державного регулювання, гармонізувати процедури з правом ЄС, забезпечити відповідність видобутку вимогам сталого розвитку, створити відкритий реєстр екологічних ризиків та рішень.

6. *Синергія екологічних, цифрових та правових рішень у формуванні моделі сталого видобутку.* Поєднання цифрових моделей, вимог екологічного законодавства ЄС та ESG-критеріїв формує комплексний підхід до управління транспортними процесами у кар'єрах. Така інтеграція забезпечує зниження викидів забруднюючих речовин, підвищує енергоефективність, робить процеси прозорими для контролю та аудиту, підтримує підготовку достовірної ESG-звітності, підвищує інвестиційну привабливість підприємств, сприяє гармонізації українського законодавства з правом ЄС.

Таким чином, цифровізація, правова модернізація та екологічне управління утворюють єдиний стратегічний контур, необхідний для переходу української гірничої промисловості до стандартів сталого розвитку.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження узагальнило підходи до інтеграції екологічних стандартів ЄС, ESG-критеріїв та цифрових технологій у систему управління внутрішньокар'єрним транспортом. Сталий видобуток вимагає поєднання правових, управлінських та цифрових інструментів, які забезпечують прозорість, екологічну ефективність і відповідальність виробництва. Стандарти ЄС (IED, EU Taxonomy, Green Deal) визначають рамки для зменшення викидів і підвищення енергоефективності, а ESG-критерії – комплексну оцінку екологічних, соціальних та управлінських аспектів діяльності. Цифрові моделі, аналітика, IoT-моніторинг і технологія Digital Twin дають змогу точно оцінювати впливи, оптимізувати логістику та зменшувати навантаження на довкілля. Європейські інструменти регулювання (e-permitting, INSPIRE, one-stop-shop) підсилюють прозорість і сприяють гармонізації практик із правом ЄС. Синергія цих рішень формує цілісну модель сталого видобутку та підтримує інтеграцію України в європейській екологічний простір.

У перспективі подальших досліджень – розроблення інтегрованих цифрових платформ для об'єднання прогнозних моделей, моніторингу та ESG-звітності в єдину систему управління; удосконалення алгоритмів машинного

навчання для точнішого прогнозування викидів та роботи техніки в різних умовах кар'єру; розвиток Digital Twin, що дозволить моделювати повний виробничий цикл із урахуванням екологічних та економічних показників; аналіз можливостей імплементації

європейських цифрових інструментів регулювання (e-permitting, INSPIRE) у національну систему екологічного контролю; оцінка впливу політик ЄС і механізмів зеленого фінансування на модернізацію транспортної інфраструктури та екологічні показники підприємств.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Герасимчук Л. О., Кириленко Н. П., Валерко Р. А., Пацева І. Г. Екологічні ризики та їх оцінювання в контексті сталого розвитку видобувних підприємств. *Екологічні науки*. 2025. № 3(60). С. 31–36. DOI: 10.32846/2306-9716/2025.есо.3-60.5
2. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Кириленко Н. П., Пацева І. Г. Інтегрована модель оцінки та управління екологічними ризиками (на прикладі сфери транспортування гірничовидобувних підприємств). *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2025. № 2(500). С. 344–352. DOI: 10.15589/znp2025.2(500).45.
3. Alarie S., Gamache M. Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 2002. 16. С. 59–76.
4. Anwar A., Younis M., Ullah I. Impact of Urbanization and Economic Growth on CO₂ Emission: A Case of Far East Asian Countries. *Int J Environ Res Public Health*. 2020. 17(7). 2531. DOI: 10.3390/ijerph17072531
5. Ashtiani M., Moradi A., Doucette J., Nasab H. A Stochastic Energy-Efficient Robust Simulation-Based Truck Dispatching Optimization for Simultaneous GHG Mitigation and Operational Excellence in Open-Pit Mines. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2024. 138. 103026. DOI: 10.1016/j.simpat.2024.103026
6. Azadi M., Northey S. A., Ali S. H., Edraki M. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience*. 2020. 13(2). P. 100–104.
7. Banasiewicz A., Moosavi F., Kotyla M., Śliwiński P., Krot P., Wodecki J., Zimroz R. Forecasting of NO_x Emissions of Diesel LHD Vehicles in Underground Mines – An ANN-Based Regression Approach. *Applied Sciences*. 2023. 13(17):9965. DOI: 10.3390/app13179965
8. Choomkong A., Sirikunpitak S., Darnsawasdi R., Yordkayhun S. A study of CO₂ Emission Sources and Sinks in Thailand. *Energy Procedia*. 2017. 138. P. 452–457. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.198.
9. Filipova N., Rasputna T. Ukrainian dimension stone industry: problems and solutions. *Geoingegneria Ambientale e Mineraria (GEAM)*. 2018. 153. P. 5–12.
10. Gavrilyuk R., Negoda I., Lohvynenko O. Assessment of the impact of quarry development within the Ukrainian Shield on groundwater in the context of an environmental impact assessment (using the Vyryv granite quarry as an example). *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*. 2024. 17(1). P. 93–108. DOI: 10.30836/igs.2522-9753.2024.308419
11. Liao J., Hu J., Zhong J., Yan F., Chen P., Hu Y., Zhu L. An experimental investigation of particle and NO_x emissions for a non-road diesel engine equipped with an integrated DOC+CDPF+SCR aftertreatment system during different operations. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. 29(42), 63815–63836. DOI: 10.1007/s11356-022-20152-x
12. Licciardello, C., Di Marco, A., Biagini, S., Tayeh, K., & Palazzuoli, D. From Remote Sensing to Decision Support System for Industrial Quarry Basins. In book: *Geomatics and Geospatial Technologies*, 2022. P. 385–404. DOI: 10.1007/978-3-030-94426-1_28
13. Montani, C. XXXIII Rapporto marmo e pietre nel mondo 2022. Carrara, 2022, 312 p.
14. Mykhailov, V. Highly prospective object of the mineral and raw material base of Ukraine. Part 2. Non-metallic minerals. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2024. 3(106). P. 47–56. DOI: 10.17721/1728-2713.106.06.
15. Panteleeva, N. B., Syvyj, M. J., Kalinichenko, O. O., & Volik, O. Building stone resources of Dnipropetrovsk region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. 1049(1), 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/1049/1/012033
16. Saik P., Cherniaiev O., Anisimov O., Dychkovskiy R., Adamchuk A. Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. 17(4). P. 91–102. DOI: 10.33271/mining17.04.091
17. Sandhu G. S., Frey H. C., Bartelt-Hunt S., Jones E. Real-world activity, fuel use, and emissions of diesel side-loader refuse trucks. *Atmospheric Environment*. 2016. 129. P. 98–104. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.01.014
18. Zheng X., Lu Y., Ma C., Yuan J., Stenseth N. C., Hessen D. O., Tian H., Chen D., Chen Y., Zhang S. Greenhouse gas emissions from extractive industries in a globalized era. *Journal of Environmental Management*. 2023. 343(3), 118172. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118172

REFERENCES:

1. Herasymchuk, L., Valerko, R., Kyrylenko, N., & Patseva, I. (2025). Ekolohichni ryzyky ta yikh otsiniuvannia v konteksti staloho rozvytku vydobuvnykh pidpryemstv [Environmental risks and their assessment in the context of sustainable development of mining enterprises]. *Ekolohichni nauky – Ecological Sciences*, 3(60), 31–36. DOI: 10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.5 [in Ukrainian].
2. Herasymchuk, L., Valerko, R., Kyrylenko, N., & Patseva, I. (2025). Intehrovana model otsynky ta upravlinnia ekolohichnykh ryzykamy (na prykladi sfery transportuvannia hirnychovydobuvnykh pidpryemstv) [An integrated model for assessing and managing environmental risks (based on the example of the transport operations of mining enterprises)]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admirala Makarova – Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, № 2(500), 344–352. DOI: 10.15589/znp2025.2(500).45 [in Ukrainian].
3. Alarie, S., & Gamache, M. (2002). Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining*, 16, 59–76.
4. Anwar, A., Younis, M., & Ullah, I. (2020). Impact of Urbanization and Economic Growth on CO₂ Emission: A Case of Far East Asian Countries. *Int J Environ Res Public Health*, 17(7):2531. DOI: 10.3390/ijerph17072531
5. Ashtiani, M., Moradi, A., Doucette, J., & Nasab, H. (2024). A Stochastic Energy-Efficient Robust Simulation-Based Truck Dispatching Optimization for Simultaneous GHG Mitigation and Operational Excellence in Open-Pit Mines. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 138, 103026. DOI: 10.1016/j.simpat.2024.103026
6. Azadi, M., Northey, S. A., Ali, S. H., & Edraki, M. (2020). Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience*. 13(2), 100–104.
7. Banasiewicz, A., Moosavi, F., Kotyla, M., Śliwiński, P., Krot, P., Wodecki, J., & Zimroz, R. (2023). Forecasting of NO_x Emissions of Diesel LHD Vehicles in Underground Mines – An ANN-Based Regression Approach. *Applied Sciences*, 13(17), 9965. DOI: 10.3390/app13179965
8. Choomkong, A., Sirikunpitak, S., Darnsawasdi, R., & Yordkayhun, S. (2017). A study of CO₂ Emission Sources and Sinks in Thailand. *Energy Procedia*, 138, 452–457. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.198
9. Filipova, N., & Rasputna, T. (2018). Ukrainian dimension stone industry: problems and solutions. *Geoinżynieria Ambientale e Mineraria (GEAM)*, 153, 5–12.
10. Gavrilyuk, R., Negoda, I., & Lohvynenko, O. (2024). Assessment of the impact of quarry development within the Ukrainian Shield on groundwater in the context of an environmental impact assessment (using the Vyryv granite quarry as an example). *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*, 17(1), 93–108. DOI: 10.30836/igs.2522-9753.2024.308419
11. Liao, J., Hu J., Zhong J., Yan F., Chen P., Hu Y., & Zhu L. (2022). An experimental investigation of particle and NO_x emissions for a non-road diesel engine equipped with an integrated DOC+CDPF+SCR aftertreatment system during different operations. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(42), 63815–63836. DOI: 10.1007/s11356-022-20152-x
12. Licciardello, C., Di Marco, A., Biagini, S., Tayeh, K., & Palazzuoli, D. (2022). From Remote Sensing to Decision Support System for Industrial Quarry Basins. In book: *Geomatics and Geospatial Technologies*. DOI: 10.1007/978-3-030-94426-1_28
13. Montani, C. (2022). XXXIII Rapporto marmo e pietre nel mondo 2022. Carrara. 312 p.
14. Mykhailov, V. (2024). Highly prospective object of the mineral and raw material base of Ukraine. Part 2. Non-metallic minerals. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(106), 47–56. DOI: 10.17721/1728-2713.106.06
15. Panteleeva, N. B., Syvyj, M. J., Kalinichenko, O. O., & Volik, O. (2022). Building stone resources of Dnipropetrovsk region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049(1), 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/1049/1/012033
16. Saik, P., Cherniaev, O., Anisimov, O., Dychkovskiy, R., & Adamchuk, A. (2023). Mining of non-metallic mineral deposits in the context of Ukraine's reconstruction in the war and post-war periods. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 91–102. DOI: 10.33271/mining17.04.091
17. Sandhu, G. S., Frey, H. C., Bartelt-Hunt, S., & Jones, E. (2016). Real-world activity, fuel use, and emissions of diesel side-loader refuse trucks. *Atmospheric Environment*, 129, 98–104. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.01.014
18. Zheng, X., Lu, Y., Ma, C., Yuan, J., Stenseth, N. C., Hessen, D. O., Tian, H., Chen, D., Chen, Y., & Zhang, S. (2023). Greenhouse gas emissions from extractive industries in a globalized era. *Journal of Environmental Management*, 343(3), 118172. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118172

Стаття надійшла: 20.11.2025

Прийнято: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025