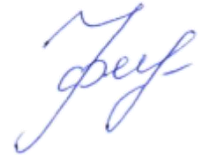


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

КИРИЛЕНКО НІНА ПАВЛІВНА



УДК 502:504:622.68(043)

**КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ТА УПРАВЛІННЯ
ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ
НА КАР'ЄРАХ БЛОЧНОГО ОБЛИЦЮВАЛЬНОГО КАМЕНЮ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Житомир – 2025

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.
Робота виконана в Державному університеті «Житомирська політехніка»
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник — доктор технічних наук, професор
ПАЦЕВА Ірина Григорівна,
Державний університет «Житомирська політехніка»
завідувач кафедри екології та природоохоронних
технологій, м. Житомир

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
ВАМБОЛЬ Сергій Олександрович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут»
завідувач кафедри «Безпека праці та навколишнього
середовища», м. Харків

доктор технічних наук, професор
ПАВЛИЧЕНКО Артем Володимирович,
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
перший проректор, професор кафедри екології та
технологій захисту навколишнього середовища,
м. Дніпро

Захист дисертації відбудеться 07 листопада 2025 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 14.052.04 у Державному університеті «Житомирська політехніка» за адресою: 10005, Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103, конференц-зала.

З дисертацією можна ознайомитися на офіційному сайті університету за посиланням <https://ztu.edu.ua/site/department?id=142> та у бібліотеці Державного університету «Житомирська політехніка» за адресою: 10005, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103.

Автореферат розісланий 07 жовтня 2025 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 14.052.04



В.О. ШЛАПАК

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Гірничодобувна промисловість України перебуває у фазі глибоких трансформацій, що зумовлені поєднанням глобальних та внутрішніх чинників. Серед ключових викликів слід відзначити макроекономічну нестабільність, повномасштабну агресію з боку Російської Федерації, енергетичну кризу, подорожчання паливно-мастильних матеріалів та зростання витрат на логістичні операції. Ці фактори створюють суттєве навантаження на виробничі процеси гірничих підприємств і потребують пошуку нових підходів до забезпечення їхньої ефективності та екологічної стійкості.

Особливої актуальності набувають питання, пов'язані з транспортними операціями у кар'єрах з видобування блочного облицювального каменю. У структурі собівартості продукції саме транспортна складова може досягати 60–65 %, а її екологічні наслідки формують значну частину техногенного навантаження на довкілля. До основних проблем належать: великі ухили внутрішньокар'єрних доріг (до 20–21 %), низький рівень механізації контролю, використання застарілої дизельної техніки та перевищення питомих витрат пального порівняно з передовими міжнародними практиками.

З екологічної точки зору транспортні процеси є головним джерелом викидів парникових газів (CO_2), оксидів азоту (NO_x), сірки (SO_x) та твердих частинок (PM). У середньому на 1 т видобутого блоку може припадати до 3–5 кг CO_2 -еквіваленту, що зумовлює суттєвий внесок у загальний вуглецевий слід галузі. Окрім атмосферних викидів, на довкілля негативно впливають шумове навантаження, пиловиділення та порушення стану земель у зоні транспортної інфраструктури кар'єрів. В умовах орієнтації України на інтеграцію до європейського ринку, де діють жорсткі вимоги щодо декарбонізації виробництва, ці фактори стають критично важливими для забезпечення конкурентоспроможності підприємств.

Світова практика демонструє швидкий розвиток цифрових рішень у сфері управління транспортною логістикою. Використання систем управління автопарком (Fleet Management Systems), Інтернету речей (IoT), цифрових двійників (Digital Twin) та алгоритмів машинного навчання дозволяє знижувати споживання пального на 20–30 %, скорочувати викиди шкідливих речовин до 40 % та підвищувати продуктивність техніки. Проте у вітчизняних кар'єрах рівень впровадження подібних рішень залишається обмеженим. Відсутня інтегрована система, що поєднувала б математичне моделювання, дані моніторингу з польових сенсорів, прогнозні алгоритми та екологічні оцінки.

Таким чином, комплексна оцінка та управління екологічними ризиками транспортних операцій на кар'єрах блочного облицювального каменю є актуальною науково-практичною задачею, що дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля, оптимізувати витрати ресурсів та впровадити цифрові технології для підвищення ефективності та сталості гірничодобувної діяльності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в межах державних та регіональних програм, спрямованих на забезпечення сталого розвитку, зменшення техногенного навантаження та впливу змін клімату на урбанізоване середовище, екосистеми та якість життя населення.

Робота відповідає завданням Стратегії екологічної безпеки та адаптації до змін клімату України на період до 2030 року від 20.10.2021 № 1363-р.

Робота виконана в межах Перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки» Державного університету «Житомирська політехніка» за бюджетною програмою №2201390 «Підтримка пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок у закладах вищої освіти» (наказ МОН від 25.03.2021 №372).

Дисертаційне дослідження виконано у межах низки наукових програм і міжнародних проєктів, що забезпечили комплексність підходу до вивчення транспортних процесів у кар'єрах блочного каменю.

Перший етап дослідження здійснювався як частина НДР «Оптимізація технологічних видобувних комплексів для умов родовищ високоміцного блочного облицювального каменю» (державний реєстраційний номер 0114U004257), що виконувалася з квітня 2014 р. до листопада 2015 р. Автор є співвиконавцем дослідження, результати якого було впроваджено на Кам'янобрідському Північному родовищі габро в межах ТОВ «Граніт інвест» (с. Кам'яний Брід, Коростишівський р-н, Житомирська обл.).

Подальші наукові результати отримані в рамках реалізації міжнародного науково-дослідного гранту Європейського Союзу Erasmus Mundus EUROEAST (01.10.2015 – 01.04.2016) на базі Туринського політехнічного університету (м. Турин, Італія). Польові дослідження здійснювалися у грудні 2015 року безпосередньо на мармурових кар'єрах м. Каррара (регіон Тоскана, провінція Масса-Каррара, Італія), зокрема на кар'єрах № 46 «Polvaccio», № 42 «Amministrazione», № 25 «Canalbianco», № 56 «Battaglino C».

Додаткові експериментальні дослідження проводилися в межах короткострокового гранту Європейського Союзу Erasmus+ KA171 «Міжнародна кредитна мобільність» на базі Університету м. Кальярі (Італія) у співпраці з підприємством BS Quarrysar Group, що здійснює видобування мармуру торгової марки Orosei Diano (м. Орозеї, провінція Нуоро, регіон Сардинія, Італія) у період з 5 по 11 листопада 2023 року, що забезпечує поєднання експериментальних польових даних і цифрового моделювання для комплексного вирішення завдань оптимізації транспортних процесів у кар'єрах блочного каменю.

Додатково результати дослідження екологічного компонента отримано у межах наукових робіт «Обґрунтування транспортних робіт в умовах блочного кар'єру» (2017–2021 рр.), а також «Використання відходів каменеобробки у виробництві керамічних матеріалів» (2020–2023 рр., ТОВ «НІКА-ГРАН»), де було детально проаналізовано екологічні ризики транспортування, шляхи зменшення паливних витрат і викидів, а також вплив побічних продуктів каменеобробки на довкілля.

Таким чином, дисертаційне дослідження має інтегрований характер і поєднує три взаємопов'язані складові: технічну (оптимізація транспортних процесів та функціонування машинно-транспортних комплексів), екологічну (мінімізація викидів забруднюючих речовин, підвищення рівня екологічної безпеки та ресурсоефективності виробництва) та економічну (скорочення витрат паливно-енергетичних ресурсів, підвищення коефіцієнта використання техніки й посилення конкурентоспроможності підприємств).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка та наукове обґрунтування інтегрованої цифрової моделі оптимізації транспортних процесів у системі відкритої розробки родовищ блочного облицювального каменю, яка базується на застосуванні аналітичних математичних моделей, принципів цифрового двійника та цифрових систем моніторингу, з метою підвищення паливної ефективності, зниження рівня викидів і забезпечення оперативної підтримки управлінських рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- провести аналіз сучасного стану організації транспортних процесів у кар'єрах блочного облицювального каменю, виявити основні проблеми паливної неефективності, логістичних втрат та екологічних ризиків;

- обґрунтувати вибір та реалізувати аналітичні математичні моделі прогнозування витрат пального з урахуванням ухилів траси, маси та габаритів вантажу, типу техніки, швидкісного режиму, коефіцієнтів зчеплення і надійності;

- інтегрувати розроблену модель у цифрове середовище Google Colab з можливістю зв'язку з Google Sheets для автоматизованого введення параметрів і збереження результатів. Передбачити функції порівняння логістичних сценаріїв, візуалізації ключових індикаторів транспортування та оцінки екологічного навантаження;

- забезпечити адаптацію моделі до реальних виробничих умов на основі принципів цифрового двійника (Digital Twin), що дозволяє імітувати різні сценарії транспортування із врахуванням змінних виробничих, технічних та погодних параметрів;

- провести емпіричне дослідження функціонування транспортної системи реального кар'єру (на прикладі ТОВ «Глобал Стоун Кастл»), валідувати математичні та машинні моделі (MLR, Random Forest), визначити оптимальні режими експлуатації техніки та оцінити вплив організації перевезень на рівень викидів.

- розробити практичні рекомендації для зниження витрат пального та екологічного навантаження шляхом оптимізації логістики, маршрутизації, планування графіків технічного обслуговування, впровадження цифрових інструментів для підтримки прийняття рішень, а також впровадження альтернативного палива та електрифікації транспортних робіт.

Об'єктом дослідження є внутрішньокар'єрні транспортні операції у системах відкритої розробки родовищ блочного облицювального каменю, що супроводжуються споживанням дизельного пального та утворенням техногенного навантаження на довкілля.

Предметом дослідження є аналітичні та цифрові моделі прогнозування витрат пального і супутніх викидів забруднюючих речовин у транспортних процесах видобувних підприємств, а також алгоритми оптимізації логістики з урахуванням технічних, організаційних та природно-кліматичних чинників. Моделі базуються на поєднанні аналітичних залежностей, результатів екологічного аудиту, цифрового моніторингу техніки та візуалізації даних у середовищі Google Colab і Google Sheets з елементами концепції цифрового двійника.

Методи дослідження. Методологічна основа дисертаційного дослідження базується на поєднанні сучасних підходів до аналітичного моделювання,

статистичного аналізу, оцінки екологічних ризиків та цифрової візуалізації для оптимізації транспортних процесів у кар'єрах блочного облицювального каменю. У роботі використано методи варіаційного та кореляційного аналізу, побудови регресійних залежностей, методи оцінки життєвого циклу (LCA), а також методологію оцінки викидів згідно з підходами IPCC Tier 3. Для підвищення точності прогнозування витрат пального застосовано алгоритми машинного навчання (Random Forest, багатофакторна лінійна регресія, штучні нейронні мережі), що дозволило досягти коефіцієнта детермінації понад 0,90 при моделюванні фактичних даних. Особливу увагу приділено впливу ухилу дороги, ваги вантажу, швидкості руху, тривалості рейсу та коефіцієнта зчеплення на витрати пального та обсяги викидів.

Вихідною інформаційною базою стали первинні експлуатаційні дані, зібрані у процесі виробничого моніторингу транспортної діяльності на Південній ділянці Межирічського родовища, що належить ТОВ «Глобал Стоун Кастл» включно з геометричними параметрами блоків, обсягами видобутку, маршрутами перевезень, паспортними та фактичними витратами пального, технічними характеристиками техніки, режимами її роботи та результатами екологічного аудиту. Зібрані дані опрацьовано в середовищі електронних таблиць (MS Excel, Google Sheets), з подальшим застосуванням математичних розрахунків у Google Colab. На основі цього середовища реалізовано повнофункціональну цифрову модель із візуалізацією результатів і можливістю інтеграції з виробничими таблицями, що забезпечує гнучке адаптування моделі під потреби конкретного кар'єру.

У дослідженні застосовано концепцію цифрового двійника транспортної системи кар'єру – через моделювання логістичних процесів у реальному часі з урахуванням геометрії блоків, технічних характеристик машин, дорожньо-кліматичних умов та сценаріїв навантаження. Для оцінки викидів шкідливих речовин (CO_2 , NO_x , SO_2 , PM) використано емісійні коефіцієнти з урахуванням типу двигуна, навантаження і тривалості роботи. Реалізовано екологічний блок розрахунків, який дозволяє оперативно порівнювати сценарії транспортування за екологічними критеріями.

Для виявлення основних факторів, що впливають на паливну ефективність кар'єрного транспорту, було проведено статистичний аналіз експлуатаційних даних із застосуванням методів варіаційного та кореляційного аналізу, а також побудови багатофакторних регресійних залежностей. Особливу увагу приділено оцінці чутливості витрат дизельного пального до таких змінних, як ухил дороги, маса вантажу, довжина маршруту, швидкість руху, технічний стан обладнання, погодні умови та коефіцієнт зчеплення. На основі отриманих залежностей побудовано математичні моделі прогнозування витрат пального та рівня супутніх викидів, які реалізовано в програмному середовищі Google Colab на мові програмування Python. Для розрахунків використовувалися власноруч реалізовані аналітичні формули, засновані на емпіричних коефіцієнтах витрат пального, нормативних значеннях витрат техніки в умовах змінного навантаження (маси та геометричних параметрів блоків), а також поправках на ухил траси та тип маршруту (завантажений/порожній хід).

У моделі реалізовано екологічний блок оцінки викидів CO_2 , NO_x , SO_2 та твердих частинок (PM) за допомогою емісійних коефіцієнтів відповідно до підходу IPCC

Tier 3, з урахуванням типу двигуна, обсягу пального, навантаження та тривалості циклу. Також здійснено розширену візуалізацію результатів у Google Sheets, з можливістю порівняння сценаріїв та підрахунку інтегральних показників ефективності. Для розширеного аналізу екологічних наслідків застосовувався метод оцінки життєвого циклу (LCA), що дозволив порівняти різні логістичні сценарії з точки зору їхнього інтегрального впливу на довкілля.

На основі розробленої системи реалізовано цифровий двійник транспортної підсистеми кар'єру, що дозволяє моделювати логістичні процеси у різних виробничих сценаріях: зміна кількості блоків у рейсі, зміна геометрії блоків, погодні обмеження, регламент техобслуговування тощо. У рамках імітаційного моделювання були сформовані альтернативні сценарії функціонування машинно-транспортного комплексу з різними стратегіями логістики – зокрема, максимізація навантаження, мінімізація довжини маршруту, обмеження швидкості, зменшення часу простою.

Результати моделювання пройшли експертну верифікацію шляхом порівняння з фактичними виробничими даними, що підтвердило високу відповідність розрахункових і реальних показників витрат пального та обсягів викидів. Модель була адаптована до умов підприємства ТОВ «Глобал Стоун Кастл» (Межирічське родовище) і продемонструвала потенціал зниження витрат дизельного пального до 31 % та скорочення викидів CO₂ на 30–42,5 % залежно від сценарію організації перевезень.

Встановлено, що моделі на основі штучних нейронних мереж та алгоритму Random Forest забезпечують високу точність прогнозування, із коефіцієнтом детермінації понад 0,90. На основі цих моделей розроблено алгоритм підтримки прийняття рішень для управління транспортними процесами у реальному часі. Прототип системи було апробовано на підприємстві ТОВ «Глобал Стоун Кастл», що підтвердило її прикладну ефективність та придатність до впровадження в умовах реального виробництва.

Таким чином, сукупність використаних у дослідженні методів забезпечила комплексне охоплення проблематики та сприяла створенню ефективного інструментарію цифрового управління екологічними ризиками транспортних процесів у кар'єрах з видобування природного каменю відкритим способом.

Використання технологій штучного інтелекту. Технології штучного інтелекту (ШІ) (ChatGPT) використовувалися у дисертаційному дослідженні виключно з метою пошуку та систематизації інформації під час вивчення міжнародних стандартів оцінки викидів (IPCC, ISO 14040/14044, EEA), методик екологічного аудиту та цифрового моніторингу транспортних процесів у гірничодобувній промисловості, а також для перекладу англomовних наукових джерел і нормативних документів. Технології ШІ не застосовувалися для генерування тексту дисертації чи формулювання наукових результатів.

Наукова новизна отриманих результатів:

уперше:

– створено комплексну інтегровану цифрову модель транспортних процесів у кар'єрах блочного облицювального каменю, яка поєднує аналітичні математичні залежності, імітаційне моделювання, алгоритми машинного навчання та принципи цифрового двійника, що забезпечує можливість прогнозування витрат дизельного

пального, собівартості транспортування та екологічних наслідків з урахуванням ухилу доріг, маси й геометрії блоків, технічного стану машин, швидкісного режиму та сезонних чинників;

- запропоновано комплексну систему оцінки екологічних ризиків транспортних процесів у кар'єрах, яка інтегрує прогнозування витрат пального та викидів парникових газів і забруднюючих речовин (CO_2 , NO_x , SO_2 , PM) з результатами екологічного аудиту та даними польового моніторингу, що дозволяє обґрунтувати потенціал зниження витрат дизельного пального до 31 % та скорочення викидів CO_2 на 30–42,5 % залежно від вибраної логістичної стратегії;

удосконалено:

- комплексну методологію багатофакторної оцінки енергоефективності та екологічної результативності транспортних процесів у кар'єрах блочного каменю шляхом інтеграції аналітичних розрахунків, імітаційного моделювання та прогнозних моделей машинного навчання (MLR, Random Forest), що, на відміну від існуючих підходів, забезпечує можливість комплексного аналізу впливу виробничих, технічних і природних чинників на витрати пального та рівень викидів;

- методику сценарного аналізу логістичних стратегій (максимізація завантаження, скорочення кількості маршрутів, оптимізація швидкісного режиму, зниження простоїв), що, на відміну від традиційних розрахунків, дозволяє кількісно оцінювати ефекти від впровадження альтернативних управлінських рішень та обґрунтовувати їх екологічну доцільність;

- підхід до оцінювання екологічних наслідків транспортних процесів через поєднання прогнозування витрат пального та викидів CO_2 , NO_x , SO_2 , PM з результатами екологічного аудиту та даними польових досліджень, що, на відміну від існуючих систем оцінювання, дозволяє врахувати як кумулятивний ефект впливу на довкілля, так і варіативність сценаріїв розвитку виробництва;

- інструментарій оперативного управління внутрішньокар'єрним транспортом шляхом інтеграції цифрової моделі з Google Colab та Google Sheets, що, на відміну від локальних моделей, забезпечує динамічне коригування параметрів, автоматизоване формування розрахунків та візуалізацію результатів у реальному часі для підвищення ефективності управлінських рішень;

набуло подальшого розвитку:

- методи оптимізації логістики внутрішньокар'єрного транспорту через інтеграцію цифрової моделі з середовищем Google Colab та Google Sheets, що дозволило реалізувати оперативне введення вхідних параметрів, автоматизований розрахунок та візуалізацію результатів у реальному часі з можливістю моделювання змінних виробничих і кліматичних сценаріїв;

- науково-методичний підхід до застосування принципів цифрового двійника в управлінні транспортними процесами у кар'єрах, який забезпечує динамічне коригування управлінських рішень, адаптацію до технічного стану обладнання та врахування сезонних чинників, що, на відміну від існуючих підходів, створює основу для побудови адаптивних систем управління;

- теоретичні основи комплексної оцінки екологічних ризиків транспортних процесів у гірничій галузі шляхом інтеграції прогнозних ML-моделей витрат

пального і викидів (CO_2 , NO_x , SO_2 , PM) з результатами екологічного аудиту та польового моніторингу, що дозволяє формувати науково обґрунтовані рішення для зменшення енергоспоживання та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження мають істотне практичне значення для підвищення екологічної безпеки та паливної ефективності гірничодобувних підприємств, зокрема у сфері видобутку блочного облицювального каменю, та можуть бути впроваджені на кількох рівнях господарювання:

– *на регіональному рівні:* розроблено цифрові інструменти прогнозування витрат пального та оптимізації маршрутів транспортування блоків; алгоритми оцінки екологічного навантаження (ТОВ «Глобал Стоун Кастл»); розроблено та застосовано цифрові моделі планування перевезень (ТОВ «КЛМ Гранресурс», довідка, без номера від 15.08.2025); впроваджено систему моніторингу витрат дизельного пального та цифрові методи оцінки собівартості транспортування; заходи оптимізації маршрутів і графіків роботи техніки (ТОВ «Магма-Пласт ЛТД», довідка, без номера від 12.08.2025).

– *на рівні суб'єктів господарювання:* розроблено рекомендації щодо оцінки впливу на довкілля при плануванні та модернізації видобувних об'єктів (ТОВ «ЕКО-МБ», довідка № 12/01 від 12.08.2025 р.).

– *у навчальному процесі:* матеріали дисертаційного дослідження інтегровані у програми підготовки студентів за спеціальністю «Екологія», «Технології захисту навколишнього середовища» та «Гірництво» на першому (бакалаврському) та другому (магістерському) рівнях вищої освіти у вигляді навчально-методичного забезпечення дисциплін: «Міжнародна діяльність в індустрії блочного каменю», «Основи рекультивації та ремедіації», «Фітомайнінг та екологічне відновлення гірничих територій», «Гейміфікація в еко-гірництві» та «Відкриті гірничі роботи» (Державний університет «Житомирська політехніка», довідка № 44-23.07/1051 від 11.08.2025 р.) Результати використовуються у курсах підвищення кваліфікації фахівців гірничої галузі в рамках програм з екологізації виробництва та цифрової трансформації, зокрема в межах міжнародних освітніх проєктів «Інтеграція рамок та норм ЄС в сфері індустрії блочного каменю в Україні» (101085202–INTEUAS–ERASMUS-JMO-2022-HEI-TCH-RSCH), «Магістерська програма з еко-гірництва та інноваційного управління природними ресурсами» (101082621–EMINReM–ERASMUS-EDU-2022-CBHE) та «Інтеграція стандартів ЄС у сфері охорони навколишнього середовища в Україні» (101127363–EUEPU–ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH).

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в самостійному формулюванні мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження, а також у визначенні його актуальності з позицій сучасних викликів екологічної безпеки та цифрової трансформації гірничодобувної промисловості. Здобувачем самостійно розроблено програму дослідження, проведено збір, обробку та систематизацію експлуатаційних даних щодо роботи машинно-транспортного комплексу у кар'єрах з видобутку блочного облицювального каменю. Самостійно реалізовано математичне моделювання витрат дизельного пального з урахуванням ухилів транспортних

шляхів, маси вантажу, технічного стану машин та інших факторів, що впливають на паливну ефективність.

Здобувачем розроблено та реалізовано алгоритми машинного навчання (MLR, Random Forest), виконано порівняльний аналіз їхньої точності, проведено оцінку впливу різних змінних на екологічну результативність транспортних процесів. Самостійно здійснено розрахунки обсягів викидів шкідливих речовин на основі методики Tier 3 (IPCC Guidelines), виконано оцінку життєвого циклу транспортних процесів з урахуванням екологічного навантаження. Дисертантом розроблено цифровий прототип системи оптимізації логістики, що поєднує інструменти візуалізації, прогностичні моделі та модулі контролю ключових екологічних показників.

Окремою частиною внеску є інтеграція розроблених моделей у цифрове середовище для їх апробації в реальних виробничих умовах на базі підприємства ТОВ «Глобал Стоун Кастл». Здобувачем сформульовано наукову новизну, обґрунтовано практичну значущість одержаних результатів, розроблено практичні рекомендації щодо зниження паливних витрат, оптимізації логістики та мінімізації екологічних ризиків транспортної діяльності у кар'єрах. Усі положення, висновки та пропозиції, наведені в дисертації, є результатом особистої наукової праці здобувача

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на 9 науково-технічних конференціях: XXXVII науково-практична міжвузівська конференція, присвячена Дню науки «Розробка родовищ корисних копалин. Промислова екологія» (12–13 травня 2011 р., Житомир), VIII Krakow Conference of Young Scientists (26–28.09.2013 р., м. Краків, Польща), The 1st International Sustainable Stone conference (20 травня 2016 р., м. Кассара, Італія), International Scientific Jean Monnet Conference «Building sustainable EU society for the future» (12–13 грудня 2024 р., м. Загреб, Хорватія) та інших наукових заходах, поданих у списку публікацій у авторефераті.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 наукових праць, з них: 4 статті у наукових фахових виданнях України; 4 статті в закордонних наукових періодичних виданнях, з яких 3 – у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus; 2 статті в інших наукових періодичних виданнях України; 9 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 267 сторінок друкованого тексту, 39 рисунків, 18 таблиць та 4 додатки на 56 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 172 сторінки. Список використаних джерел містить 215 найменування на 25 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано ідею, мету і завдання досліджень, визначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертації, структуру і обсяг роботи.

Розділ 1 «Аналіз сучасних досліджень з питань екобезпеки та енергоефективності транспортування у відкритій розробці родовищ» присвячено

аналізу сучасного стану каменедобувної промисловості та виявленню екологічних і енергетичних викликів транспортних процесів у кар'єрах блочного облицювального каменю. Встановлено, що транспортування є одним із найбільш енергоємних етапів виробництва, формуючи 45–65 % собівартості продукції та споживаючи у середньому близько 100 тис. літрів дизельного пального на рік для одного кар'єру, що еквівалентно 267 т CO₂. За довоєнних обсягів роботи близько 250 кар'єрів в Україні сумарні викиди могли перевищувати 66,75 тис. т CO₂ на рік, тобто понад 18 % від усіх викидів добувної промисловості. З'ясовано, що ухили внутрішньокар'єрних доріг сягають 20–21 % при оптимальному значенні 8–10 %, що істотно підвищує витрати пального та викиди забруднюючих речовин.

Бібліометричний аналіз наукової літератури засвідчив, що дослідження екологічних ризиків транспортування у гірничій промисловості згруповані у сім кластерів, серед яких найбільш релевантними є моделювання транспортних процесів, оцінка впливу пилу та викидів на здоров'я населення, просторовий аналіз джерел забруднення та дослідження хімічної поведінки забруднювачів. Емпіричні дослідження підтверджують, що транспортні засоби можуть генерувати до 24 % шумового навантаження в зоні кар'єру, а перевитрати пального від використання застарілих навантажувачів сягають 22,7 %. Раціоналізація маршрутів за допомогою математичних моделей дозволяє скоротити річні витрати в середньому на 13 %, а перехід на системи In-Pit Crushing and Conveying (IPCC) – знизити енергоспоживання на 36 %.

Огляд технологічних рішень показав, що найбільш поширеними є комбінації фронтальних навантажувачів та автосамоскидів, продуктивність яких у поєднанні на 1,8 рази перевищує інші варіанти організації транспорту. Доведено, що модернізація техніки до стандартів Tier 4 Final/Euro VI здатна знизити викиди NO_x і PM на 80–90 %, а впровадження біодизелю та HVO скорочує викиди CO₂ до 80 %. Електрифікація транспортних ділянок дозволяє зменшити витрати дизельного пального на підйомах до 70 %. Використання систем управління автопарком (FMS) та оптимізація маршрутів забезпечують економію пального на 10–30 % і пропорційне скорочення викидів.

Таким чином, результати аналізу підтверджують доцільність створення інтегрованої цифрової моделі управління транспортними процесами, яка поєднуватиме математичне моделювання, імітаційні сценарії, цифровий моніторинг та алгоритми машинного навчання. Такий підхід дозволить одночасно досягти підвищення паливної ефективності (на 10–30 %), зниження викидів CO₂ (на 20–40 %) і забезпечити баланс між економічною ефективністю та екологічною безпекою виробництва.

У Розділі 2 **«Методика та методологія дослідження»** обґрунтовано методологічні та методичні засади дослідження, визначено вихідні техніко-екологічні параметри об'єкта та сформовано програму подальшого моделювання. Методологічна база ґрунтується на інтеграції міжнародних стандартів IPCC, ISO 14040/14044, ЕЕА, а також на багаторічних польових вимірюваннях на підприємствах ТОВ «Граніт-інвест» (2013–2016) та ТОВ «Глобал Стоун Кастл» (2020–2024). Для збору даних застосовано хронометраж транспортних циклів, вимірювання витрат пального, GPS-ідентифікацію маршрутів, визначення геометричних параметрів та маси блоків.

Аналіз показав, що транспортна складова сягає 50–65 % собівартості продукції. Середньодобові витрати дизельного пального усієї техніки підприємства становлять 380–420 л, що відповідає 1,02–1,12 т CO₂-екв./добу. У масштабах галузі (≈ 250 кар'єрів) річні викиди перевищують 66,7 тис. т CO₂, або 18,2 % загальних викидів добувної промисловості України.

Для обробки емпіричних даних розроблено цифрову модель у Python (Google Colab), інтегровану з Google Sheets для оперативного обміну даними. Використано бібліотеки Matplotlib та Plotly для побудови графіків, діаграм і 3D-моделей блоків у кузовах автосамоскидів (рис. 1). Це забезпечило можливість валідації ухилів і довжини трас, точне відтворення маршрутів і аналіз просторових параметрів.

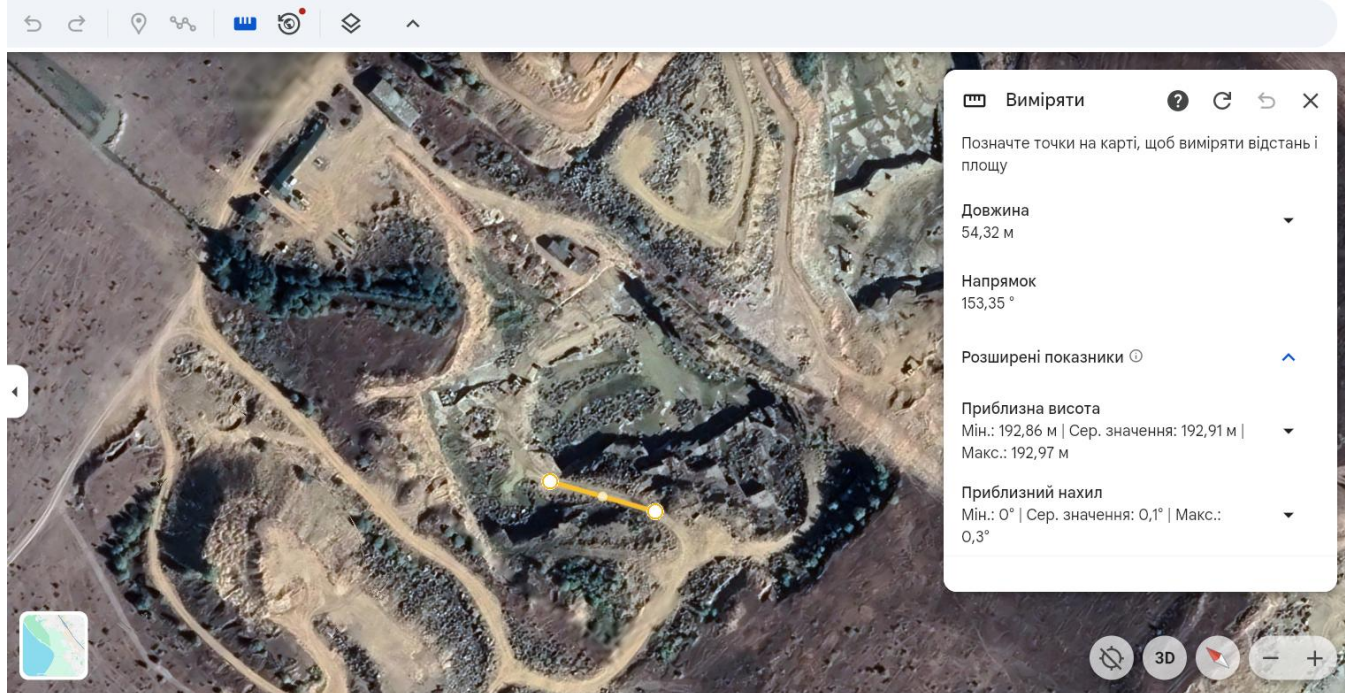


Рис. 1. Розрахунок середніх ухилів за висотною різницею між ключовими точками кар'єрних доріг (дані з відкритих джерел Google Earth Pro)

Сформовано структурований набір даних, що включає параметри траси (довжина, ухил, тип покриття), техніки (вантажопідйомність, витрати пального, коефіцієнти простою), блоків (геометрія, маса, щільність), погодних умов та експлуатаційних даних (кількість рейсів, час циклів). Окремо виділено економічні параметри (вартість пального, тариф на оплату праці, коефіцієнт експлуатаційних витрат). Узагальнена структура представлена на рис. 2.

Детальна характеристика досліджуваних підприємств наведена на прикладі ТОВ «Глобал Стоун Кастл» (рис. 3). Встановлено, що довжина внутрішньокар'єрних маршрутів становить 200–500 м при ухилі 8–18 %. Покриття переважно щебеневе, що в суху погоду збільшує викиди пилу в 1,5–2 рази.

Вихідні техніко-екологічні параметри наведені у таблиці 1, дані для розрахунку автотранспорту – у таблиці 2, а продуктивність і режим роботи кар'єру – у таблиці 3. Ці дані є базою для подальшого економічного та екологічного моделювання.



Рис. 2. Структура набору даних для моделювання транспортних робіт на кар'єрах блочного каменю



Рис. 3. Загальний вид кар'єру

Таблиця 1

Вихідні техніко-екологічні параметри ТОВ «ГЛОБАЛ СТОУН КАСТЛ»

Параметр	Значення	Примітка
Довжина внутрішньокар'єрного маршруту, м	200–500	GPS-вимірювання
Середній ухил, %	8–18	Визначено інклінометром
Тип покриття	Щебінь, змішане	Сприяє пилоутворенню
Вантажопідйомність автосамоскидів, т	16	Технічний паспорт
Об'єм ковша навантажувача, м³	3–5	Технічний паспорт
Паспортна витрата палива автосамоскида, л/км	0,65 (+0,1 на 1% ухилу)	Для руху з вантажем
Паспортна витрата палива навантажувача, л/мотогод	25–30	Залежить від навантаження
Витрати палива автосамоскидами, л/км	1,05	Полеві вимірювання
Еквівалент викидів CO ₂ , т/добу	0,675–1,08	Розраховано за IPCC
Зростання PM _{2.5} +PM ₁₀ на ґрунтових ділянках	×1,5–2	У суху погоду

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку автотранспорту

№ з/п	Найменування	Один. виміру	Вид вантажу			
			Блоки	Окол	Розкрит	
					Скельний	Пухкий
1	Об'єм перевезень:					
	- річний	м ³	5000	14720	598	4064
	- змінний	м ³ / т	19,2 / 50,5	56,6/149	6,2 / 16,3	42,3/ 67,9
2	Режим роботи:					
	- число робочих днів за рік	день	260	260	96	96
	- число змін за добу	змін	1	1	1	1
	- тривалість зміни	година	8	8	8	8
3	Об'ємна маса вантажу	т/м ³	2,63	2,63	2,63	1,6
4	Тип навантажувального механізму		CAT – 980H	FH -255	FH -255	FH -255
5	Місткість ковша екскаватора	м ³	6,8	1,4	1,4	1,4
6	Категорія порід по ДБН Д.2.2-1-99		-	IV	IV	II
7	Коефіцієнт використання ковша		0,4	0,56	0,56	0,84
8	Маса породи в ковші екскаватора	т	7,2	2,0	2,0	2,0
9	Кількість ковшів в кузові автосамоскиду		2	8	8	8
10	Середній час циклу навантажувального механізму	с	150	30	30	28
11	Відстань перевезення	км	0,5	0,5	0,5	0,5

Таблиця 3

Дані про продуктивність і режим роботи кар'єру

№№ п/п	Показники	Од. виміру	Розк- рив	Тріщинуваті граніти	Добування		
					всього	в тому числі	
						блоки	окол
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Річна продуктивність	м ³	3623	962	19500	4166	14989
2	Режим роботи		Сезонний		Цілорічний		
3	Число робочих днів за рік	день	19	6	260	260	260
4	Кількість змін за добу	змін	1	1	1	1	1
5	Тривалість зміни	год.	8	8	8	8	8
6	Продуктивність:						
	- добова	м ³	190,7	160,3	75	16	57,7
	- змінна	м ³	190,7	160,3	75	16	57,7

У рамках дослідження реалізовано алгоритми обчислення витрат палива, викидів забруднюючих речовин, економічної оцінки та логістичної оптимізації. Виконано сценарний аналіз (базовий, оптимізований, стресовий), що дозволяє оцінити чутливість системи до змін ухилів, маси блоків та погодних умов. Узагальнена схема методології представлена на рис. 4.

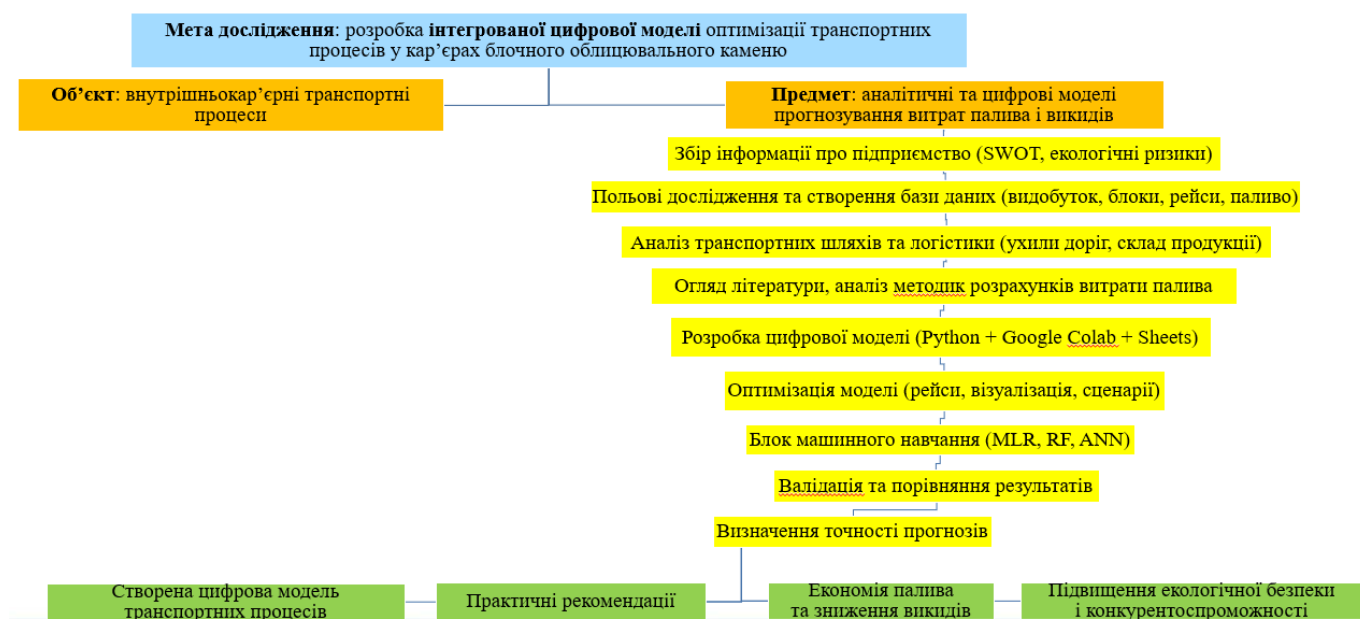


Рис. 4. Методологічна схема дослідження оптимізації транспортних процесів у кар'єрах блочного каменю

У Розділі 3 «Науково-практична оцінка та оптимізація екологічних параметрів транспортних процесів у кар'єрах блочного каменю» проведено кількісну оцінку екологічних параметрів внутрішньокар'єрних транспортних процесів та розроблено цифрові моделі для оптимізації логістики в умовах Межирічського родовища граніту.

Встановлено, що транспортна логістика кар'єру формує до 65 % собівартості продукції та понад 70–90 % усіх прямих викидів парникових газів підприємства. Середньодобове споживання дизельного пального становить 250–400 л, що відповідає 0,675–1,08 т CO₂-екв./добу. У річному вимірі внутрішньокар'єрні машини та механізми підприємства споживають до 100 тис. л дизелю, формуючи понад 226 т CO₂-екв. на рік (табл. 4).

Таблиця 4

Сумарні викиди ТОВ «ГЛОБАЛ СТОУН КАСТЛ» за джерелами та групами речовин

Джерело викидів	CO ₂ (т/рік)	NO _x (т/рік)	SO ₂ (т/рік)	PM (т/рік)	CO (т/рік)	NMVOC (т/рік)	Інші (т/рік)	Разом (т/рік)	Загальна частка, %
Транспортні операції	210,87	2,005	0,289	0,465	3,649	0,548	0,011	217,84	91 %
Технологічні процеси та допоміжні операції	15,779	0,0319	–	3,99	0,201	0,007	0,004	20,01	9 %
Разом	226,65	2,037	0,289	4,455	3,85	0,555	0,015	237,87	100 %

Проведений аналіз структури викидів засвідчив, що понад 85 % припадає на CO₂, а решта на оксиди азоту (NO_x), сірки (SO₂), тверді частки (PM_{2.5}, PM₁₀) та CO (рис. 5). Викиди NO_x і CO₂ перевищують орієнтовно допустимі рівні на 20–30 %, що зумовлює підвищений ризик для локальної якості повітря.

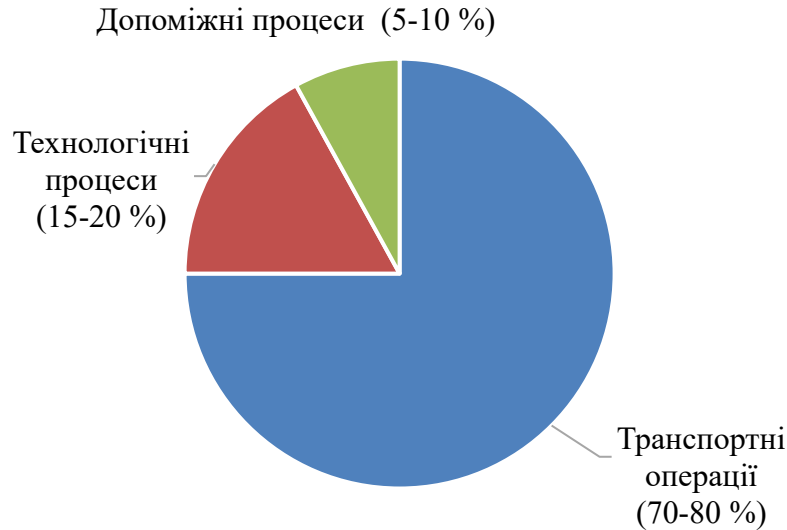


Рис. 5. Структура джерел атмосферних викидів типових кар'єрів блочного каменю

Для підвищення достовірності результатів розроблено цифрову модель у середовищі Google Colab із інтеграцією до Google Sheets. Модель враховує параметри дороги, техніки та товарних блоків, дозволяє автоматично обчислювати витрати пального, час циклів, собівартість перевезень і масу викидів CO_2 , NO_x , SO_2 , PM . Її архітектура складається з модулів геометричного аналізу блоків, розрахунку витрат пального, оцінки викидів та економічної ефективності (рис. 6–8).

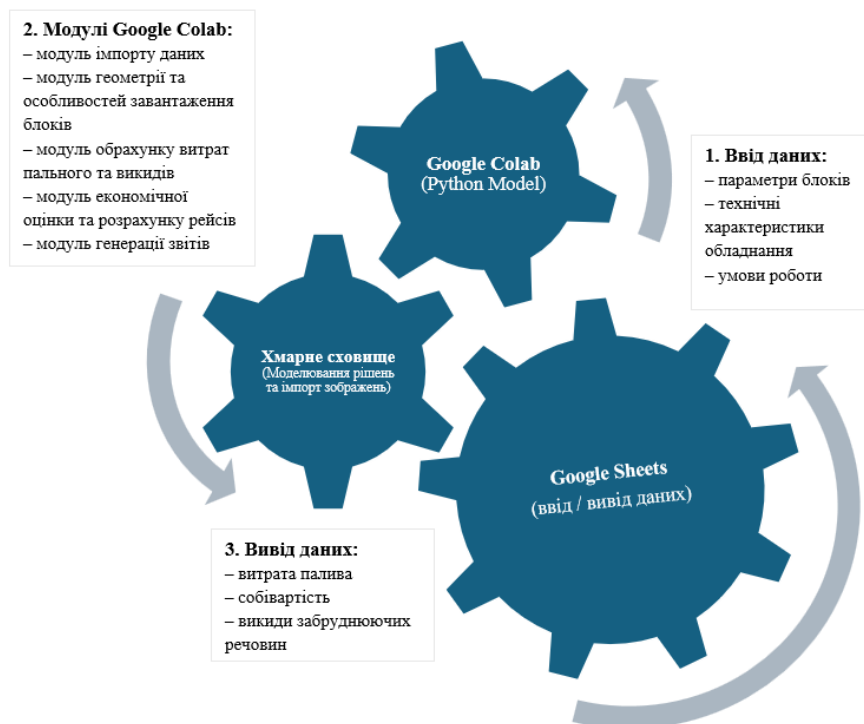


Рис 6. IT-архітектура цифрової моделі

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Сценарій	Кількість блоків	Ухил (коєф)	Ухил (градуси)	Витрата пального (л)	Вартість пального (г)	Експл. витрати	Зарплата (грн)	Собівартість тр	Собівартість 1 м3	Придатний	Причини		
2	Loader (блок 1)	1	0.08	4.57	4.85	263.77	211.02	22.73	497.52	169.66	Так	-		
3	Loader (блок 2)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
4	Loader (блок 3)	1	0.08	4.57	4.83	262.34	209.87	22.73	494.94	916.56	Так	-		
5	Loader (блок 4)	1	0.08	4.57	4.85	263.72	210.98	22.73	497.43	174.54	Так	-		
6	Loader (блок 5)	1	0.08	4.57	4.84	263.16	210.53	22.73	496.42	259.77	Так	-		
7	Loader (блок 6)	1	0.08	4.57	4.83	262.35	209.88	22.73	494.95	899.92	Так	-		
8	Loader (блок 7)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
9	Loader (блок 8)	1	0.08	4.57	4.85	263.76	211.01	22.73	497.49	171.13	Так	-		
10	Loader (блок 9)	1	0.08	4.57	4.85	263.45	210.76	22.73	496.94	207.06	Так	-		
11	Loader (блок 10)	1	0.08	4.57	4.83	262.5	210	22.73	495.23	611.4	Так	-		
12	Loader (блок 11)	1	0.08	4.57	4.86	264.04	211.23	22.73	497.99	147.55	Так	-		
13	Loader (блок 12)	1	0.08	4.57	4.85	263.6	210.88	22.73	497.21	187.91	Так	-		
14	Loader (блок 13)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
15	Loader (блок 14)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
16	Loader (блок 15)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
17	Loader (блок 16)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
18	Loader (блок 17)	1	0.08	4.57	4.83	262.55	210.04	22.73	495.31	562.85	Так	-		
19	Loader (блок 18)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
20	Loader (блок 19)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
21	Loader (блок 20)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
22	Loader (блок 21)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
23	Loader (блок 22)	1	0.08	4.57	0	0	0	0	0	0	Ні	-	Занадто короткий для розміщення на вилах	
24														

Рис. 7. Розрахунок собівартості транспортування та придатність блоків для переміщення навантажувачем

Рейс	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	ID Блоку(-ів)	Об'єм блоків (м³)	Собівартість рейсу (грн)	Собівартість 1 м³ (грн)	Витрата пального (л)	CO ₂ (кг)	NO _x (кг)	SO ₂ (кг)	PM (кг)	
Рейс самоскида ВБ Рейс 1	3, 4	3.39	836.42	246.73	5.7	15.28	0.285	0.0228	0.0057	
Рейс навантажувача 3 (порівняння)	3	0.54	494.94	916.56	4.83	12.94	0.2415	0.0193	0.0048	
Рейс навантажувача 4 (порівняння)	4	2.85	497.43	174.54	4.85	13	0.2425	0.0194	0.0049	
Рейс самоскида ВБ Рейс 2	5, 6	2.461	830.82	337.59	5.64	15.12	0.282	0.0226	0.0056	
Рейс навантажувача 5 (порівняння)	5	1.911	496.42	259.77	4.84	12.97	0.242	0.0194	0.0048	
Рейс навантажувача 6 (порівняння)	6	0.55	494.95	899.92	4.83	12.94	0.2415	0.0193	0.0048	
Рейс самоскида ВБ Рейс 3	8, 17	3.787	838.82	221.5	5.73	15.36	0.2865	0.0229	0.0057	
Рейс навантажувача 8 (порівняння)	8	2.907	497.49	171.13	4.85	13	0.2425	0.0194	0.0049	
Рейс навантажувача 17 (порівняння)	17	0.88	495.31	562.85	4.83	12.94	0.2415	0.0193	0.0048	
Рейс самоскида МБ Рейс 1	2, 7, 13, 14, 15, 16	1.729	1854.84	1072.78	16.55	44.35	0.8275	0.0662	0.0166	
Рейс самоскида МБ Рейс 2	18, 19, 20, 21, 22	2.058	1560.45	758.24	13.91	37.28	0.6955	0.0556	0.0139	
Рейс навантажувача 11	11	3.375	497.99	147.55	4.86	13.02	0.243	0.0194	0.0049	
Рейс навантажувача 12	12	2.646	497.21	187.91	4.85	13	0.2425	0.0194	0.0049	

Рис. 8. Вивід даних про маси викидів по кожному рейсу

Розроблене рішення має модульну структуру (рис. 9), що спрощує його підтримку та модифікацію під різні умови. В складі цифрової моделі основними модулями є модулі геометричного аналізу і перевірки габаритів; розкладки малих блоків в кузові автосамоскида; розрахунку витрат пального; розрахунку викидів; економічної оцінки рейсів; генерації звітів у Google Sheets.

```

# Авторизація Google Drive
from google.colab import auth
auth.authenticate_user()
print("Авторизація пройдена успішно!")

[ ] # Підключення до Google Drive
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

[ ] # Підключення бібліотек
import pandas as pd
import numpy as np
from datetime import datetime
print("Готово до роботи")

[ ] # Завантаження таблиці Google Sheets та попередній аналіз
# Сюди вставляється весь код моделі (за потреби надішлю повний блок)
print("[!] Тут буде код моделі транспортування блоку...")

[!] Тут буде код моделі транспортування блоку...

import gspread
from google.oauth2.service_account import Credentials

# Заміни назву на свою!

```

Рис. 9. Модулі цифрової моделі в середовищі Google Colab

Модель пройшла верифікацію на основі фактичних виробничих даних підприємства. Середнє відхилення розрахованих показників від натурних не перевищило 5–7 %, коефіцієнт детермінації для прогнозу витрат пального досяг $R^2=0,94$.

Порівняння базового та оптимізованих сценаріїв транспортування показало, що завдяки раціональному комплектуванню блоків у кузові та зменшенню холостих пробігів питомі витрати пального зменшуються з 3,9 л/м³ до 2,2–2,7 л/м³. Це відповідає скороченню викидів CO₂ на 30–42,5 % та зниженню собівартості транспортування на 26–31 % (табл. 5, рис. 10).

Таблиця 5

Узагальнені результати моделювання для базового та оптимізованих сценаріїв транспортування

Показник	Baseline (існуюча логістика)	Оптимізований сценарій	Зміна, %
Витрати пального, л/100 м ³	105,2	72,5	–31 %
Собівартість перевезення 1 м ³ , грн	148,0	110,2	–26 %
Викиди CO ₂ , кг/100 м ³	326,5	228,0	–30 %
Викиди NO _x , кг/100 м ³	6,1	4,5	–26 %
Викиди SO ₂ , кг/100 м ³	0,5	0,35	–30 %
Викиди твердих часток (PM), кг/100 м ³	0,12	0,09	–25 %

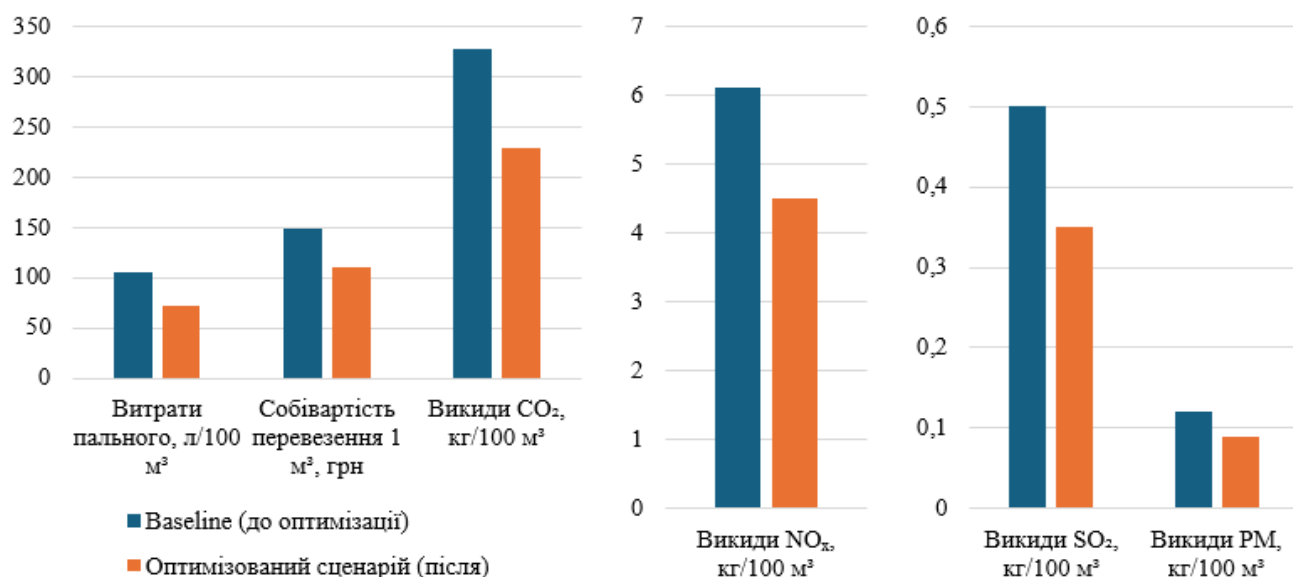


Рис. 10. Порівняння витрат палива, собівартості транспортування та викидів CO₂ у базовому та оптимізованих сценаріях

У Розділі 4 «Стратегії зниження екологічних ризиків і використання результатів дослідження» розроблено стратегії мінімізації екологічних ризиків транспортних процесів у кар'єрах блочного каменю та обґрунтовано практичну значущість цифрової моделі прогнозування паливних витрат і викидів.

Запропонована модель може бути інтегрована у систему цифрового управління виробництвом, що передбачає синхронізацію з телеметрією, GPS-навігацією,

диспетчерськими модулями та IoT-сенсорами якості повітря (рис. 11). Це забезпечує формування проактивної екологічної стратегії, яка дозволяє не лише відслідковувати, але й керувати екологічними параметрами у режимі реального часу.

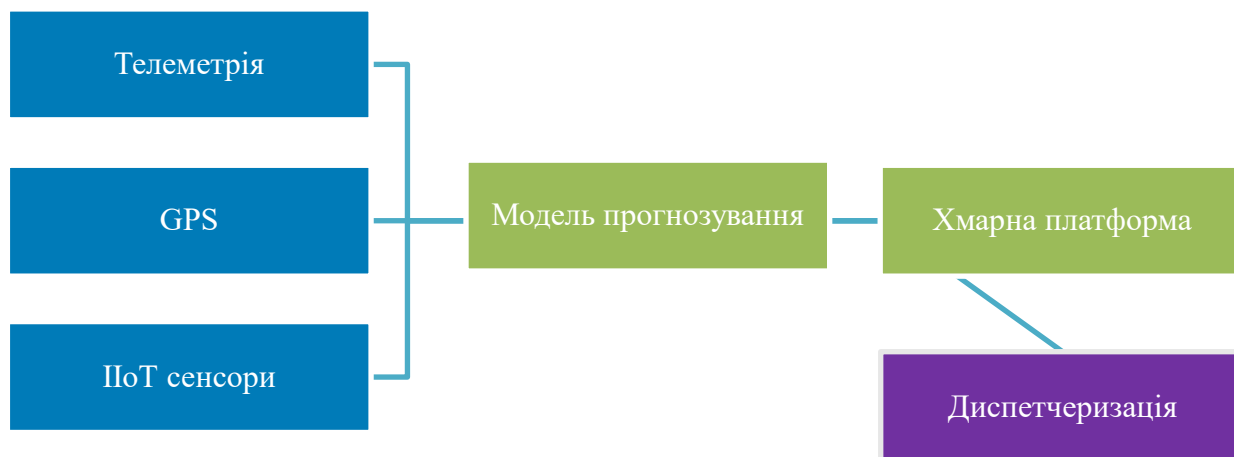


Рис. 11. Схема інтеграції цифрової моделі у виробничу систему

Розроблено комплекс КРІ для оцінки ефективності впровадження моделі, які охоплюють абсолютні, відносні та інтегральні показники. За результатами моделювання доведено, що оптимізація логістичних маршрутів і завантаження техніки дозволяє зменшити витрати пального на 25–40 %, а викиди CO_2 – у 1,6–1,7 рази. Для оксидів азоту, сірки та твердих часток досягнуто зниження на 30–60 % (рис. 12). Економічний ефект становить 9–12 тис. грн економії в частині паливних витрат на кожних 100 м³ перевезених блоків, що також супроводжується зменшенням амортизаційних витрат і підвищенням рентабельності виробництва.

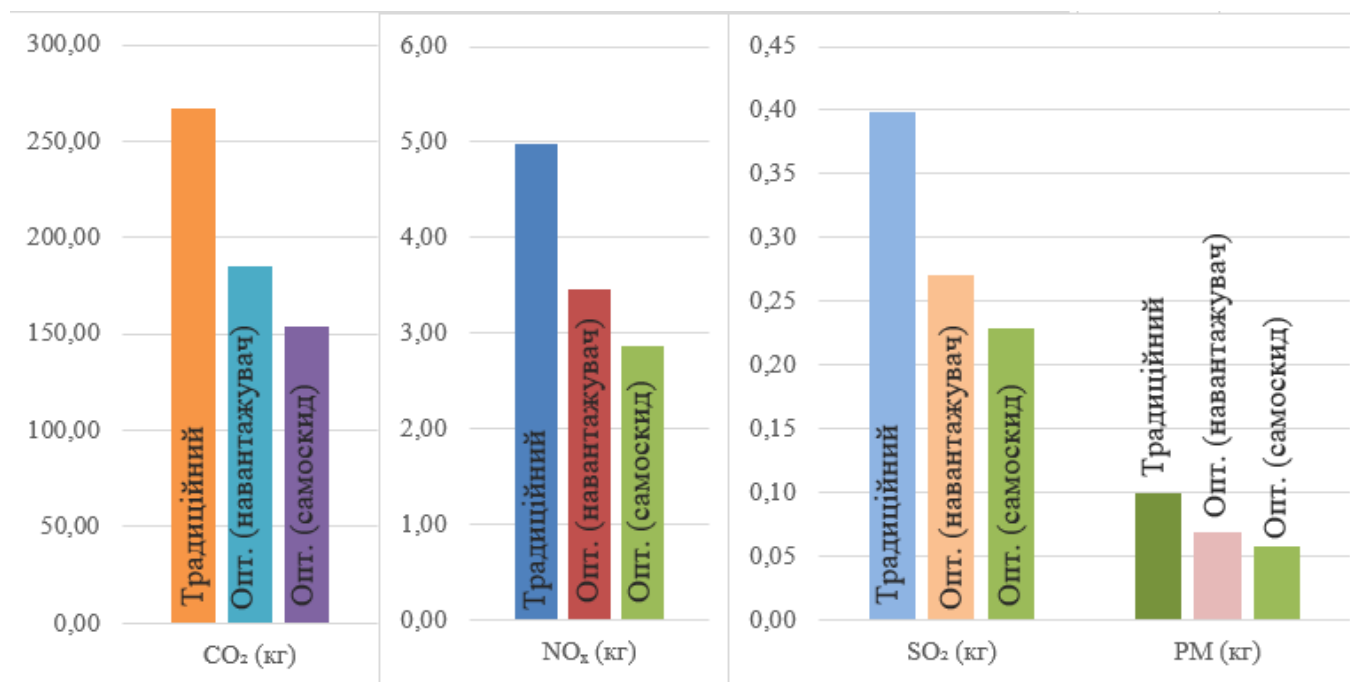


Рис. 12. Порівняння обсягів атмосферних викидів (CO_2 , NO_x , SO_2 , PM) у традиційному та оптимізованих сценаріях транспортування

Запропоновано багаторівневу стратегію подальшої декарбонізації транспорту: 1) короткострокові заходи – використання біопалива та впровадження цифрових інструментів логістики; 2) середньострокові – застосування гібридних технологій і тролей-асистованих самоскидів; 3) довгострокові – електрифікація техніки та інтеграція підприємств у «зелену» енергетику.

Окрему увагу приділено рекомендаціям щодо цифрового управління екологічними ризиками на основі IoT-сенсорів, ГІС-платформ та алгоритмів AI/ML. Така система забезпечує постійний моніторинг концентрацій CO₂, NO_x, SO₂ і PM, прогнозування критичних ситуацій, а також формування автоматизованих управлінських рішень.

Практична апробація моделі здійснена в умовах кар'єрів Житомирщини (Межирічське, Кам'янобрідське, Губенківське, Пшеничне родовища), де підтверджено зниження витрат пального на 26–31 % та скорочення викидів CO₂ на 30–42,5 %. Результати апробації відображено у публікаціях автора та впроваджено у діяльність підприємств галузі.

Узагальнено, що впровадження цифрової моделі прогнозування забезпечує одночасно екологічний, економічний і соціальний ефекти: скорочення паливних витрат і викидів забруднюючих речовин; підвищення конкурентоспроможності підприємств і відповідності вимогам ЄС (зокрема Директиві 2008/50/ЄС та Європейському зеленому курсу); зменшення ризиків для працівників і покращення умов праці; створення нових можливостей для цифровізації та інновацій у гірничій промисловості.

Таким чином, розроблений інструментарій формує підґрунтя для переходу галузі до екологічно безпечного та ресурсоефективного розвитку в умовах європейської інтеграції.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення рівня екологічної безпеки та енергоефективності транспортних процесів у кар'єрах блочного облицювального каменю шляхом розроблення, адаптації та впровадження цифрових моделей оптимізації логістики з урахуванням технічних, економічних і природоохоронних факторів. Комплексний підхід, запропонований у дослідженні, дозволяє не лише мінімізувати негативний вплив гірничо-транспортної діяльності на довкілля, а й покращити економічні показники підприємств у межах «Зеленого курсу» ЄС.

Узагальнено основні результати дослідження:

1. Проведено глибокий системний аналіз наукових публікацій, нормативно-технічної документації та практичних підходів до організації транспортних процесів у каменедобувній галузі, зокрема в кар'єрах із видобутку блочного облицювального каменю. На основі огляду літератури та виробничих даних встановлено, що саме транспортні операції формують критичну частку загальних витрат підприємств – до 65 % собівартості продукції, що є суттєвим навантаженням на економіку видобувного сектору. Крім того, ці процеси виступають основним джерелом техногенного навантаження на довкілля, генеруючи до 80–90 % загального обсягу викидів діоксиду вуглецю (CO₂), оксидів азоту (NO_x), оксидів сірки (SO₂) та твердих

частинок (PM). Особливо негативним є вплив при русі техніки на підйомних трасах із високим ухилом і нестабільним ґрунтовим покриттям, що супроводжується підвищеним пилоутворенням та перевитратою дизельного пального. У такому контексті доведено необхідність модернізації існуючих логістичних схем на основі принципів екологічної безпеки, енергоефективності та цифровізації. Це, у свою чергу, зумовило актуальність розроблення цифрової моделі прогнозування та управління екологічними ризиками, що й стало основною науковою і практичною метою даної роботи.

2. Уточнено техніко-екологічні параметри реальних виробничих умов функціонування машинно-транспортного комплексу на прикладі кар'єру ТОВ «ГЛОБАЛ СТОУН КАСТЛ» – одного з провідних підприємств з видобутку блочного облицювального каменю в Україні. У ході дослідження зібрано та систематизовано детальні дані щодо конфігурацій транспортних маршрутів, ухилів, довжини перегонів, середньої маси вантажів, кількості блоків у рейсі, швидкості руху, витрат дизельного пального на одиницю продукції, а також тривалості простоїв. Особливу увагу приділено оцінці екологічних параметрів, зокрема – пилоутворення та викидів забруднюючих речовин (CO_2 , NO_x , SO_2 , PM), які розраховано на основі методики Tier 3 IPCC із урахуванням типу техніки, режимів роботи та експлуатаційних умов. Виявлено, що в сухий період року, за наявності незв'язного ґрунтового покриття та інтенсивного руху техніки по внутрішньокар'єрних дорогах, спостерігається суттєве перевищення допустимих рівнів пилоутворення та викидів CO_2 . Це свідчить про необхідність запровадження ефективних заходів щодо пилопригнічення, оптимізації логістики та моніторингу викидів у реальному часі. Результати цього етапу дослідження стали інформаційною основою для побудови та калібрування математичних моделей у подальших розділах роботи.

3. У рамках дослідження розроблено комплексну цифрову модель прогнозування та оптимізації транспортної логістики у кар'єрах блочного облицювального каменю, яка враховує як техніко-економічні, так і екологічні параметри функціонування машинно-транспортного комплексу. Модель створена з використанням сучасних алгоритмів машинного навчання (MLR, Random Forest) та реалізована у середовищі Python із інтеграцією у Google Sheets, що забезпечує її доступність для практичного впровадження на виробництві. Основними вхідними змінними моделі виступають: ухил внутрішньокар'єрних трас, маса та об'єм вантажу, технічні характеристики та технічний стан машин, тип дорожнього покриття, середня швидкість, а також сезонні фактори експлуатації. Особлива увага приділена параметрам, що безпосередньо впливають на обсяг викидів CO_2 , NO_x , SO_x і PM, дозволяючи здійснювати інтегровану оцінку екологічних ризиків. Для оцінки точності моделі та її здатності до прогнозування у змінних виробничих умовах використано загальновизнані метрики валідації: середню абсолютну відносну похибку (MAPE) та корінь середньоквадратичної помилки (RMSE). Результати валідації підтвердили високу точність прогнозування ($R^2 > 0,96$), що підтверджує надійність розробленої моделі для впровадження у реальні логістичні процеси на підприємствах з відкритим способом видобутку блочного каменю, незалежно від їхніх морфологічних особливостей. Такий підхід дозволяє оперативно виявляти неефективні сценарії використання техніки, прогнозувати пікові навантаження на

довкілля та приймати обґрунтовані управлінські рішення з урахуванням принципів сталого розвитку.

4. Проведено практичну апробацію розробленої у роботі цифрової моделі та аналітичних підходів на двох діючих підприємствах з видобутку блочного каменю – кар'єрах Межиріцького та Кам'янобрідського Північного родовищ. В рамках верифікації моделей здійснено збір та аналіз реальних виробничих даних, що охоплювали показники роботи автосамоскидів, фронтальних навантажувачів, середню витрату дизельного пального, час простою та відстані транспортування. На основі застосування оптимізованої логістики, сформованої в рамках цифрової моделі, було досягнуто зменшення витрат пального до 31 %, скорочення викидів CO₂ на рівні 30–42,5 % залежно від конфігурації маршруту та навантаження, а також підвищення показника ефективного використання техніки (PUE – Productive Use Efficiency), що свідчить про зростання загальної продуктивності та зниження непродуктивних витрат ресурсу.

5. Сформовано цілісний інструментарій цифрового управління екологічними ризиками у сфері транспортної логістики кар'єрів, що базується на інтеграції цифрових платформ моніторингу та енергоефективних рішень. Розроблені рекомендації уможливають подальшу інтеграцію цифрової моделі в єдину систему типу FMS (Fleet Management System) з використанням сенсорних IoT-пристроїв для збору телеметричних даних у реальному часі. Крім того, запропоновано переходити на альтернативні, екологічно чисті види пального – зокрема гідрогенізовану рослинну олію (HVO), що може знизити викиди CO₂ до 90 % без заміни двигунів. Завдяки цьому створюються передумови для поглибленої автоматизації логістичних рішень, контролю витрат, підвищення екологічної прозорості виробництва та відповідності міжнародним екостандартам.

6. Визначено широкий спектр соціально-економічних ефектів від реалізації запропонованих у роботі рішень, які виходять за межі суто технологічної ефективності. Зокрема, доведено, що оптимізація логістики та впровадження цифрових технологій сприяє зниженню виробничих ризиків для персоналу (через зменшення тривалості перебування у зоні підвищеної небезпеки) та покращенню умов праці. У результаті цифрової трансформації підприємств виникає потреба у нових спеціалістах – аналітиках, операторах цифрових систем, фахівцях з технічної підтримки, що сприяє створенню нових робочих місць. Крім того, підвищується імідж підприємства як екологічно відповідального суб'єкта господарювання, що відповідає вимогам CSR (Corporate Social Responsibility) та екологічної політики ЄС.

7. Дисертаційна робота має чітко виражений прикладний характер і ґрунтується на реальних виробничих даних, що забезпечує високу ступінь достовірності та релевантності результатів. Запропоновані підходи пройшли апробацію в умовах діючих підприємств, де були реалізовані перші етапи впровадження цифрової моделі у виробничі процеси. Окремі елементи дослідження використовуються у навчальному процесі в рамках підготовки фахівців за спеціальностями «Екологія», «Технології захисту навколишнього середовища» та «Гірництво» в закладах вищої освіти. Основні положення і висновки роботи представлені та обговорені на всеукраїнських і міжнародних конференціях з питань цифрової трансформації, екологічної логістики та сталого управління природними ресурсами.

Таким чином, запропоновані у дослідженні підходи забезпечують ефективну інтеграцію екологічних, технічних і цифрових факторів в управління логістикою гірничих підприємств. Це відкриває можливості для сталого розвитку каменедобувної галузі України в умовах екологічних викликів і євроінтеграційних процесів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації.

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

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: <https://doi.org/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. Т. 2, № 500. с. 344–352. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).45](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).45).

3. Ковалевич Л.А., Левицький В.Г., Білобров Д.М., **Кириленко Н.П.**, Шамрай В.І. Динаміка споживання паливно-мастильних матеріалів самоскидами на Омелянівському родовищі гранітів. *Технічна інженерія*. 2021. Т. 1, № 87. с. 142–148. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2021-1\(87\)-142-148](https://doi.org/10.26642/ten-2021-1(87)-142-148).

4. **Філіпова Н.П. (Кириленко Н.П.)** Формування технологічних комплексів на родовищах блочного облицювального каменю. *Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки*. 2016. Т. 3(78). с. 172–183.

Статті в інших наукових періодичних виданнях України:

5. Коробійчук В.В., **Кириленко Н.П.**, Махно А.М., Костенко В.К., Мамрай В.В. Інтеграція європейського досвіду оцінки якості природного каменю в Україні. *Технічна інженерія*. 2023. Т. 2, № 92. с. 217–224. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-217-224](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-217-224).

6. **Кириленко Н.**, Шамрай В., Ковалевич Л., Лебля М., Махно А. Обґрунтування транспортних робіт в умовах блочного кар'єру. *Науково-технічний журнал «ГЕОІНЖЕНЕРІЯ»*. 2021. № 5(2021). с. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.20535/2707-2096.5.2021>.

Публікації, що індексуються наукометричною базою даних Scopus:

7. **Kyrylenko N.** Substantiation of the wheel loader employment at dimension stone quarries in Ukraine. *Italian journal of engineering geology and environment (IJEGE)*. 2017. № 2. с. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2017-02.S-06>. (*Scopus, Q3*).

8. **Filipova N. (Кириленко Н.П.)**, Rasputna T. Ukrainian dimension stone industry: problems and solutions. *Geingegneria Ambientale e Mineraria (GEAM)*. 2018. № 153. с. 5–12. (*Scopus, Q3*).

9. Leonets I., **Kyrylenko N.**, Mykytenko S., Syroid Y. Impact assessment of natural stone processing techniques on the grain composition of sludge admixtures for press powder. *Geoheritage*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12371-024-01030-z>. (*Scopus, Q1*).

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях:

10. **Karimbetova N. (Кириленко Н.П.)** Shaping of technological complexes on block facing stone quarries for conditions the Ukrainian shield. *Logistyka*. 2013. Т. 4. р. 194-201 (Collection of scientific articles on CD).

2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. **Філіпова Н.П. (Кириленко Н.П.)**, Котенко В.В. Аналіз чинників, які визначають ефективність роботи технологічних комплексів на кар'єрах блочного каменю. *Розробка родовищ корисних копалин. Промислова екологія: тези XXXVII науково-практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню науки (Житомир, 12–13 травня 2011 р.)*. Житомир : Редакційно-видавничий відділ ЖДТУ, 2011. С. 309–310.

12. **Філіпова Н.П. (Кириленко Н.П.)**, Котенко В.В. Порівняльний аналіз технологічних способів відокремлення монолітів від масиву на родовищах високоміцних порід природного облицювального каменю. *Тези XXXVI науково-практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню науки (Житомир, 12-13 травня 2011 р.)*. Житомир : Житомирський державний технологічний університет, 2011. С. 171–174.

13. **Karimbetova N. (Кириленко Н.П.)** Shaping of technological complexes on block facing stone quarries for conditions the Ukrainian shield. Collection of scientific abstracts of the VIII Krakow Conference of Young Scientists (Краків, 26–28.09.2013 р.). Krakow, 2013. С. 37.

14. **Karimbetova N. (Кириленко Н.П.)**, Shapovalova O., Kobzar S. Measurement of the Movement Parameters of Elements of Diamond Wire Saw. *Current trends in young scientists' researches: Book of papers of All Ukrainian Scientific and Practical Conference (Житомир, 16 квітня 2015 р.)*. Zhytomyr : Publishing of Zhytomyr State Technological University, 2015. С. 50–53.

15. **Karimbetova N. (Кириленко Н.П.)** Substantiation of wheel loader employment at dimension stone quarries in Ukraine. 1st International Sustainable Stone conference (Карпара, 20 травня 2016 р.). Карпара, 2016.

16. Bianco I., Bobba S., **Karimbetova N. (Кириленко Н.П.)**, Kobzar S. Environmental and economic justification of dimension granite cutting technologies. *Current Trends in Young Scientists' Research: Book of Papers of All Ukrainian Scientific and Practical Conference (Житомир, 14 квітня 2016 р.)*. Житомир, 2016. С. 38–42.

17. **Кириленко Н.П.**, Котенко В.В. Техніко-економічне обґрунтування комбінованих способів відокремлення монолітів високоміцних порід на кар'єрах блочного облицювального каменю. *Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів; тези IV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Житомир, 12-13 квітня 2017 р.)*. Житомир : Житомирський державний технологічний університет, 2017. С. 1–3.

18. **Kyrylenko N.**, Korobiichuk V., Mamrai V. IoT for sustainable mining: EU-UA insights on research, education, and business. *Building sustainable EU society for the future:*

Proceedings of the International Scientific Jean Monnet Conference (Загреб, 12-13 грудня 2024 р.). Zagreb : Faculty of Economics & Business, University of Zagreb, 2025. С. 49–62.

19. **Кириленко Н.П., Шамрай В.І.** IoT для сталого гірництва: перспективи інтеграції в ЄС та Україні. *Європейські студії в галузі гірництва та екології: тези Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва»* (Житомир, 21 листопада 2024 р.). Житомир, 2024. С. 112-113.

АНОТАЦІЯ

Кириленко Н.П. Комплексна оцінка та управління екологічними ризиками транспортних процесів на кар'єрах блочного облицювального каменю. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – Екологічна безпека. – Державний університет «Житомирська політехніка», Міністерство освіти і науки України. – Житомир, 2025.

Дисертація присвячена актуальній науково-практичній проблемі – підвищенню екологічної безпеки та паливної ефективності транспортних процесів у гірничодобувних підприємствах, що здійснюють відкриту розробку родовищ блочного облицювального каменю. Значна частка енергоспоживання та викидів CO₂, NO_x, SO₂ і РМ пов'язана саме з транспортною логістикою, яка є малоефективною в умовах високих ухилів доріг, перевантаження техніки та відсутності цифрової координації.

У першому розділі дисертації обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет роботи, а також викладено методологічну основу дослідження. Здійснено огляд наукових джерел, в якому проаналізовано сучасний стан енергоефективності та екологічної результативності транспортних процесів у кар'єрах. Узагальнено наукові підходи до цифрового управління логістикою, застосування FMS (Fleet Management Systems), IoT, Digital Twin та машинного навчання (ML) для прогнозування технічного стану, витрат пального та викидів. Виявлено, що в Україні такі інструменти практично не використовуються, хоча в умовах глобальної енергетичної та кліматичної кризи вони є критично важливими.

У другому розділі проаналізовано особливості функціонування машинно-транспортних комплексів у кар'єрах облицювального каменю. Наведено детальну характеристику кар'єрної техніки, маршрутів транспортування, геометричних параметрів блоків, профілю доріг, а також сезонних коливань експлуатаційних умов. Визначено, що ухили до 21 %, нестабільна якість дорожнього покриття та надмірні простої зумовлюють високі паливні витрати, забруднення повітря та нераціональне використання техніки. В рамках розділу виконано статистичний аналіз фактичних даних підприємств ТОВ «Глобал Стоун Кастл» (Південна ділянка Межиріцького родовища) та ТОВ «Граніт інвест» (Кам'янобрідське Північне родовище габро). Встановлено ключові чинники паливної неефективності: збільшений ухил кар'єрних доріг, конфігурація маршрутів, технічний стан машин, людський фактор та відсутність систематизованого контролю за витратами.

У третьому розділі розроблено комплексну цифрову модель для прогнозування витрат пального, собівартості транспортування та пов'язаних екологічних ризиків. Модель інтегрує численні змінні, зокрема ухил, масу вантажу, довжину маршруту, коефіцієнт зчеплення, сезонні чинники та технічний стан обладнання. Розрахунки виконано на основі аналітичних залежностей із можливістю оперативного моделювання у середовищі Google Colab з інтеграцією результатів у Google Sheets. Для оцінки точності застосовано стандартні метрики (MAPE, RMSE), а також алгоритми машинного навчання, зокрема Random Forest, що забезпечило верифікацію та підтвердження надійності отриманих результатів. Також реалізовано екологічний блок оцінки викидів CO₂, NO_x, SO₂ та твердих частинок на основі емісійних коефіцієнтів. Програмна реалізація моделі здійснена в середовищі Python (Google Colab), з можливістю інтеграції у виробничі таблиці Google Sheets. Представлено результати апробації запропонованої моделі на підприємствах, що експлуатують Межиріцьке та Кам'янобрідське Північне родовища граніту та габро. Було проведено верифікацію моделей на основі фактичних виробничих даних. Встановлено, що цифрова оптимізація маршрутів, навантаження та графіків техобслуговування забезпечує зниження витрат пального до 31 %, скорочення викидів CO₂ на 30–42,5 %, а також зростання показника ефективного використання техніки (PUE). Запропонований підхід дозволяє підприємствам одночасно підвищувати економічну результативність та забезпечувати дотримання екологічних стандартів Європейського Союзу, що є надзвичайно важливим у сучасних умовах євроінтеграції.

У четвертому розділі розроблено цифровий інструментарій управління екологічними ризиками транспортних процесів у кар'єрі, що інтегрує прогнозну модель із сучасними платформами типу MineStar Edge, FMS та Digital Twin. Обґрунтовано застосування IoT-сенсорів для автоматизованого моніторингу та алгоритмів штучного інтелекту для адаптивного планування маршрутів і технічного обслуговування транспорту. Запропоновано рекомендації щодо впровадження альтернативних видів пального (зокрема HVO), електрифікації та гібридних систем. Надані інженерні та організаційні рішення забезпечують одночасне зниження паливних витрат і викидів (CO₂, NO_x, SO₂, PM), підвищення надійності роботи техніки та екологічної стійкості виробництва. В даному розділі оцінено соціально-економічний ефект реалізації дослідження. Зокрема, впровадження цифрової моделі дозволяє підвищити конкурентоспроможність підприємств, створити нові робочі місця у сфері цифрових технологій та екологічного аудиту, знизити ризики для здоров'я працівників, підвищити рівень корпоративної екологічної відповідальності.

Практична значущість полягає в можливості безпосереднього впровадження цифрової моделі для підвищення точності прогнозування витрат пального, зменшення простоїв і холостих пробігів, скорочення викидів і підтримки рішень з технічного обслуговування та логістики. Отримані результати можуть бути використані у виробничій діяльності, наукових дослідженнях та освітніх курсах із гірничої інженерії, екологічної безпеки та цифровізації гірничого виробництва, в навчальному процесі ДУ «Житомирська політехніка» та презентовані на міжнародних науково-практичних конференціях. Крім того, результати дослідження можуть слугувати науковим підґрунтям для розроблення та реалізації міжнародних наукових проєктів у межах грантових програм Європейського Союзу Horizon Europe

та LIFE у складі міжнародних консорціумів, спрямованих на підвищення енергоефективності та зниження екологічних ризиків у гірничій промисловості.

Загалом, дисертаційна робота є міждисциплінарним дослідженням, що поєднує екологічну безпеку, цифрову логістику, штучний інтелект і гірничу інженерію. Вперше запропоновано адаптовану до умов України цифрову модель управління транспортними процесами в кар'єрах облицювального каменю, яка дозволяє одночасно досягти підвищення енергоефективності, зниження викидів і забезпечення прогнозованої надійності техніки. Результати мають прикладне значення і можуть бути використані як в реальному виробництві, так і в освітньому та науковому середовищі.

Ключові слова: екологічна безпека, транспортний процес, кар'єр, цифрове моделювання, енергоефективність, викиди CO₂, Digital Twin, логістика, технічне обслуговування, гірниче виробництво.

ABSTRACT

Kyrylenko N.P. Comprehensive Assessment and Management of Environmental Risks of Transport Operations in Dimension Stone Quarries. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 21.06.01 – Environmental Safety. – Zhytomyr Polytechnic State University, Ministry of Education and Science of Ukraine. – Zhytomyr, 2025.

The dissertation addresses a pressing scientific and practical problem – enhancing environmental safety and fuel efficiency of transport processes in mining enterprises engaged in open-pit extraction of dimension stone. A significant share of energy consumption and emissions of CO₂, NO_x, SO₂, and particulate matter (PM) is associated with transport logistics, which remains inefficient under conditions of steep road gradients, equipment overloading, and the lack of digital coordination.

The first chapter of the dissertation substantiates the relevance of the research, formulates the aim, objectives, object, and subject of the study, and outlines its methodological framework. A review of scientific sources is presented, analyzing the current state of energy efficiency and environmental performance of transport processes in quarries. Scientific approaches to digital logistics management are summarized, including the application of Fleet Management Systems (FMS), IoT, Digital Twin, and Machine Learning (ML) for predicting technical conditions, fuel consumption, and emissions. It has been revealed that in Ukraine such tools are practically not applied, despite their critical importance under the conditions of the global energy and climate crisis.

The second chapter analyzes the operational characteristics of machine-transport complexes in dimension stone quarries. A detailed description is provided of quarry equipment, transportation routes, geometric parameters of blocks, road profiles, and seasonal variations in operating conditions. It is determined that road gradients of up to 21 %, unstable pavement quality, and excessive idle times result in high fuel consumption, air pollution, and inefficient use of machinery. Within the chapter, a statistical analysis of actual enterprise data was conducted for LLC Global Stone Castle (Southern section of the Mezhyrichchia deposit) and LLC Granit Invest (Kamiiianobrod North gabbro deposit). The key factors of fuel inefficiency were identified, namely: increased quarry road gradients,

route configurations, technical condition of machinery, human factors, and the lack of systematic fuel consumption monitoring.

The third chapter presents a comprehensive digital model for predicting fuel consumption, transportation costs, and associated environmental risks. The model integrates multiple variables, including road gradient, cargo mass, route length, traction coefficient, seasonal factors, and equipment technical condition. Calculations are performed using analytical dependencies, with the capability for real-time simulation in Google Colab and integration into Google Sheets. Calculations were carried out on the basis of analytical dependencies with the possibility of real-time modeling in Google Colab integrated with Google Sheets. Standard accuracy metrics (MAPE, RMSE) and machine learning algorithms, in particular Random Forest, were applied to verify and confirm the reliability of the obtained results. An environmental assessment block was also implemented to evaluate CO₂, NO_x, SO₂, and particulate matter emissions based on emission factors. The software implementation of the model was developed in Python (Google Colab) with the option of integration into production spreadsheets in Google Sheets. The proposed model was tested at enterprises operating the Mezhyritske and Kamianobridske North granite and gabbro deposits, with verification carried out using actual production data. The results demonstrated that digital optimization of routes, loading, and maintenance schedules reduces fuel consumption by up to 31 %, decreases CO₂ emissions by 30–42.5 %, and improves the productive use efficiency (PUE) of machinery. The proposed approach enables enterprises to simultaneously enhance economic performance and ensure compliance with European Union environmental standards, which is of particular importance in the current context of European integration.

The fourth chapter develops a digital toolkit for managing environmental risks of quarry transport processes, integrating the predictive model with advanced platforms such as MineStar Edge, FMS, and Digital Twin. The application of IoT sensors for automated monitoring and artificial intelligence algorithms for adaptive route planning and transport maintenance is substantiated. Recommendations are provided regarding the introduction of alternative fuels (including HVO), electrification, and hybrid systems. The proposed engineering and organizational solutions ensure simultaneous reductions in fuel consumption and emissions (CO₂, NO_x, SO₂, PM), while improving equipment reliability and the environmental sustainability of production. The chapter also evaluates the socio-economic effects of the study's implementation. In particular, the introduction of the digital model enhances enterprise competitiveness, creates new jobs in the fields of digital technologies and environmental auditing, reduces occupational health risks, and strengthens corporate environmental responsibility.

The practical significance lies in the possibility of direct implementation of the digital model to improve the accuracy of fuel consumption forecasting, reduce downtime and idle runs, decrease emissions, and support decision-making in maintenance and logistics. The obtained results can be applied in industrial operations, scientific research, and educational courses in mining engineering, environmental safety, and mining digitalization, as well as in the educational process at Zhytomyr Polytechnic State University and presented at international scientific and practical conferences. Moreover, the findings of the research may serve as a scientific foundation for the development and implementation of international research projects within the framework of the European Union's Horizon

Europe and LIFE grant programs, in the context of international consortia aimed at enhancing energy efficiency and reducing environmental risks in the mining industry.

Overall, the dissertation represents an interdisciplinary study that integrates environmental safety, digital logistics, artificial intelligence, and mining engineering. For the first time, a digital model adapted to the conditions of Ukraine is proposed for managing transport processes in dimension stone quarries, enabling simultaneous improvements in energy efficiency, emission reduction, and predictive equipment reliability. The results have applied significance and can be utilized both in real industrial practice and within educational and scientific contexts.

Keywords: environmental safety, transport process, open-pit quarry, digital modeling, energy efficiency, CO₂ emissions, Digital Twin, logistics, technical maintenance, mining industry.

Формат 60x90 1/16 Папір друкарський. Друк офсетний. Гарнітура Time New Roman.
Ум. друк. арк. 1,72. Тираж: 100 примірників. Віддруковано з готових оригіналів-
макетів автора у Державному університеті «Житомирська політехніка» 10005,
Україна, м. Житомир, вул. Чуднівська, 103