



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



**III Міжнародна науково-практична конференція**

**“ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У  
СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ”**



**3rd International Scientific and  
Practical Conference**

**INFORMATION TECHNOLOGIES  
IN THE ENVIRONMENTAL PROTECTION**

**14–15 травня 2026 р.  
м. Львів**



# **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ**

## **INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ENVIRONMENTAL PROTECTION**

Матеріали

III Міжнародної науково-практичної конференції

14-15 травня 2026 р., Україна, м. Львів

Львів

Видавництво Львівської політехніки

2026

Інформаційні технології у сфері захисту довкілля: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції, 14-15 травня 2026 р. – Навчально-наукові інститути просторового планування та перспективних технологій, комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка». – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2026. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/iter-2026> – Заголовок з екрана. – Мова укр. і англ.

ISBN 978-966-994-172-5

У збірнику опубліковано матеріали конференції, на якій розглядалися питання використання інформаційних технологій у сфері захисту оточуючого середовища, визначення найбільш важливих напрямів забезпечення екологічної безпеки, економічної доцільності впровадження захисних механізмів та створення сучасних екологічних систем з врахуванням досвіду країн світу. Матеріали збірника визначені такими напрямами досліджень, як світова та вітчизняна практика використання інформаційних технологій в дослідженнях довкілля, безпека довкілля в умовах війни з вирішенням проблем забезпечення та викликів сьогодення, екологізація економіки в контексті формування зеленого майбутнього країн Європейського Союзу, використання технологій імерсивної та розширеної реальності для моніторингу довкілля та сталого розвитку.

Видання призначене для науковців, викладачів, студентів, фахівців державних установ, громадських організацій, органів місцевого самоврядування, бізнес-структур, які використовують інформаційні технології для вирішення проблем екологічної безпеки та впровадження економічних аспектів для покращення захисту довкілля.

**УДК 338.24**

Відповідальний за випуск – Лагун А. Е.

*Матеріали подано в авторській редакції.*

*Відповідальність за зміст матеріалів, їх відповідність вимогам чинного правопису і достовірність фактів та статистичних даних несуть автори.*

ISBN 978-966-994-172-5

© Національний університет  
«Львівська політехніка», 2026

## **ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ:**

### **Співголови програмного комітету:**

- **Назарій Попадинець**, старший дослідник, доктор економічних наук, директор Навчально-наукового інституту просторового планування та перспективних технологій, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Олег Матвійків**, професор, доктор технічних наук, директор Навчально-наукового інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний університет «Львівська політехніка»

### **Члени програмного комітету:**

- **Михайло Пітюлич**, член-кореспондент національної академії наук України, доктор економічних наук, професор, директор Закарпатського регіонального центру соціально-економічних і гуманітарних досліджень НАН України (за згодою);
- **Магдалена Вежбік-Строньська**, проректор, Сілезька академія у м. Катовіце, Польща (за згодою).
- **Василь Гнатишин**, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук, Роуанський університет, Глассборо, Нью Джерсі, США (за згодою);
- **Вікторія Гнєзділова**, доцент, кандидат біологічних наук, завідувач кафедри біології та екології Карпатського національного університету імені Василя Стефаника (за згодою);
- **Ель-Кебір Гліл**, професор, доктор наук, Національний центр наукових досліджень, Гренобль, Франція (за згодою);
- **Наталія Гоц**, професор, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Володимир Грицик**, професор, доктор технічних наук, професор кафедри систем віртуальної реальності, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Юрій Грицюк**, професор, доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Людмила Даценко**, професор, доктор географічних наук, завідувач кафедри геодезії та картографії, Київський Національний університет імені Тараса Шевченка (за згодою);

- **Богдан Кшивецький**, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри технологій захисту навколишнього середовища і деревини та безпеки життєдіяльності, Національний лісотехнічний університет України (за згодою);
- **Тетяна Несторенко**, професор, Сілезька Академія у м. Катовіце, Польща (за згодою);
- **Рафаель Сейс Ортіс**, заступник директора з академічних питань та міжнародного співробітництва, кафедра промислового дизайну Політехнічного університету Валенсії, Іспанія (за згодою);
- **Александр Остенда**, професор, ректор, Сілезька Академія у м. Катовіце, Польща (за згодою);
- **Віліна Пересадько**, професор, доктор географічних наук, декан факультету геології, географії, рекреації і туризму, Харківський Національний університет імені В. Н. Каразіна (за згодою);
- **Кшиштоф Питель**, професор, доктор, професор кафедри енергетичних систем та систем охорони навколишнього середовища, Гірничо-металургійна академія ім. Станіслава Сташіца у Кракові, Польща (за згодою);
- **Богдан Поберейко**, професор, доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний лісотехнічний університет України (за згодою);
- **Віталій Ромака**, професор, доктор наук, Дрезденський технічний університет, Дрезден, Німеччина (за згодою);
- **Володимир Ромака**, професор, доктор технічних наук, професор кафедри захисту інформації, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Ганна Рудакова**, професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри технічної кібернетики Херсонського національного технічного університету (за згодою);
- **Володимир Самотий**, професор, Краківська політехніка імені Тадеуша Костюшки, Польща (за згодою);
- **Івета Седлакова**, доктор філософії, Вища школа міжнародного бізнесу ISM у м. Пряшів, Словаччина (за згодою);
- **Челе Есте́ве Сендра**, професор, доктор, директор кафедри цифрового розриву та інвалідності Політехнічного університету Валенсії, Іспанія (за згодою);
- **Ігор Скольський**, старший науковий співробітник, кандидат сільськогосподарських наук, директор природного заповідника «Розточчя» (за згодою);
- **Галина Стрямець** – старший науковий співробітник, кандидат сільськогосподарських наук, заступник директора з наукової роботи природного заповідника «Розточчя» (за згодою).

## **ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ:**

### **Голова організаційного комітету:**

**Андрій Лагун** – доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри інформаційних систем і технологій, Національний університет «Львівська політехніка»

### **ЧЛЕНИ ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМІТЕТУ:**

- **Уляна Марікуца**, доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри систем віртуальної реальності, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Мар'яна Баран**, доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних систем і технологій, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Мар'яна Сенета**, доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри автоматизованих систем управління, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Леся Угрин**, старший викладач кафедри інформаційних систем і технологій, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Іван Гілета**, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри систем віртуальної реальності, Національний університет «Львівська політехніка»;
- **Лукаш Валусяк**, доктор філософії, Сілезька академія у м. Катовіце, Польща (за згодою);
- **Оксана Полякова Нестеренко**, доцент Вищої технічної школи промислової інженерії Політехнічного університету Валенсії, Іспанія (за згодою);
- **Зоряна Сенета**, доктор філософії, заступник директора з виховної роботи навчально-наукового Інституту суспільних наук, адміністрування та права, Національного лісотехнічного університету України (за згодою).

## ЗМІСТ

| <b>СЕКЦІЯ 1. СВІТОВА ТА ВІТЧИЗНЯНА ПРАКТИКА ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ДОВКІЛЛЯ</b>                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Баран Мар'яна, Купранець Наталія, Купранець Роман</b><br>ДИДАКТИЧНА КОНВЕРГЕНЦІЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ ТА МЕТОДІВ<br>ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ У ВИКЛАДАННІ<br>ГЕОГРАФІЧНИХ ДИСЦИПЛІН: СТРАТЕГІЯ ФОРМУВАННЯ<br>ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНЦІЙ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ<br>УКРАЇНИ | 15 |
| <b>Безсонний Віталій</b><br>ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ<br>ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД                                                                                                                                            | 17 |
| <b>Береза Олександр, Даценко Людмила, Коляда Євген</b><br>ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНОГО<br>ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТРАНСПОРТНО-<br>ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ НА ОСНОВІ QGIS                                                                                    | 19 |
| <b>Вінтоняк Віталій</b><br>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЦИФРОВІЗАЦІЇ<br>ПУБЛІЧНО-АДМІНІСТРАТИВНИХ ПОСЛУГ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО<br>УПРАВЛІННЯ                                                                                                                      | 21 |
| <b>Voitenko Larysa</b><br>INFORMATION TECHNOLOGIES IN CITIZEN SCIENCE:<br>INDEPENDENT GROUNDWATER MONITORING IN THE CONTEXT OF<br>THE EU NITRATES DIRECTIVE IMPLEMENTATION IN UKRAINE                                                                                | 23 |
| <b>Войтусік Степан, Цебак Олег</b><br>РОЛЬ НИЗЬКОРЕСУРСНОЇ КРИПТОГРАФІЇ В ЗАХИСТІ<br>ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ                                                                                                                                       | 27 |
| <b>Dzhumelia Elvira</b><br>INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL RISK<br>ASSESSMENT IN AREAS AFFECTED BY POST-INDUSTRIAL SITES                                                                                                                                  | 31 |
| <b>Дрогомирецький Роман, Кавчук Ірина, Дубляк Андрій, Різничук<br/>Надія</b><br>БІОІНДИКАЦІЯ СТАНУ УРБООКОСИСТЕМИ МІСТА ІВАНО-<br>ФРАНКІВСЬК ЗА ФЛУКТУЮЧОЮ АСИМЕТРІЄЮ ЛИСТКІВ<br>BETULA PENDULA ROTH (М. ІВАНО-ФРАНКІВСЬК)                                           | 33 |
| <b>Гивлюд Анна, Гамаш Олександр</b><br>АДСОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ФОСФОРУ ПРИРОДНИМ ЦЕОЛІТОМ<br>ЯК ІНСТРУМЕНТ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ У МОЛОЧНІЙ<br>ГАЛУЗІ УКРАЇНИ                                                                                                          | 36 |

|                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Гнєзділова Вікторія</b><br>ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ І ДОВКІЛЛЯ: ВІД ЗАГРОЗ ДО<br>МОЖЛИВОСТЕЙ                                                                                                                                                              | 38 |
| <b>Іваночко Марія-Анна, Сіренко Артур</b><br>АНАЛІЗ ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА<br>ПОПУЛЯЦІЇ КОЛОРАДСЬКОГО ЖУКА (LEPTINOTARSA<br>DECAEMLINEATA SAY, 1824) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПІДХОДІВ<br>ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ           | 41 |
| <b>Казимира Ірина, Голяк Марко</b><br>МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК ДЛЯ МОНІТОРИНГУ<br>БІОРИЗНОМАНІТТА                                                                                                                                                        | 43 |
| <b>Касіянчук Дмитро, Домбровська Олександра, Вінтонів Вікторія,<br/>Карас Андрій</b><br>ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ В ОЦІНЦІ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ:<br>КАРТОГРАФІЧНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ДОРОЖНЬОЇ<br>ІНФРАСТРУКТУРИ В СКЛАДНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ               | 45 |
| <b>Kryshtop Yevhen</b><br>WASTE-TO-RESOURCE: DIGITAL TECHNOLOGIES FOR LIFE CYCLE<br>ASSESSMENT AND WASTE MANAGEMENT SYSTEMS<br>OPTIMIZATION                                                                                                          | 49 |
| <b>Volodymyr Samoty, Andrii Lagun</b><br>USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO FORECAST THE IMPACT OF<br>CLIMATE CHANGE ON ENVIRONMENTAL SECURITY OF SOCIETY                                                                                              | 52 |
| <b>Лагун Ілона, Лагун Ярослав, Стахів Роман</b><br>ПЛАТФОРМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ: ВІД ЗБОРУ ДАНИХ<br>ДО ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ<br>РІШЕНЬ                                                                                   | 54 |
| <b>Лисяк Наталія, Самотій Наталія</b><br>ГЕОДИЗАЙН ТА ПРОСТОРОВІ ДАНІ ЯК ІНСТРУМЕНТИ<br>МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ                                                                                                           | 56 |
| <b>Luchak Ivan, Semak Uliana</b><br>REMOTE SENSING APPROACHES FOR MONITORING NATURALLY<br>REGENERATED FORESTS IN AGRICULTURAL LANDSCAPES                                                                                                             | 58 |
| <b>Мельник Богдан, Муравель Володимир</b><br>ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВЕЛИКИХ ДАНИХ ДЛЯ<br>СТВОРЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У<br>МЕЖАХ КОНЦЕПЦІЇ РОЗУМНОГО МІСТА                                                                        | 60 |
| <b>Мокрий Володимир, Арустамян Едуард, Бондарь Валерія, Гордієнко<br/>Володимир, Мазепа Василь, Паньковська Галина, Шамро Наталія</b><br>БІОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО<br>ТЕСТУВАННЯ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ В УМОВАХ НПП «ПІВНІЧНЕ<br>ПОДІЛЛЯ» | 63 |

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Музика Михайло, Шамуратов Олексій</b><br>АНАЛІЗ СТАНУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЧИННИКІВ, ЩО НА НЬОГО ВПЛИВАЮТЬ                                                                                                             | 65 |
| <b>Остап'юк Василь, Бойчук Василь, Кавчук Ірина, Різничук Надія</b><br>ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЯК ІНДИКАТОР ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ (НА ПРИКЛАДІ МІСТА ІВАНО-ФРАНКІВСЬК) | 69 |
| <b>Очківський Данило, Крупка Анастасія, Польовий Віталій</b><br>РОЗРОБКА МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ВІДХОДІВ ЗА ТИПОМ                                                                                | 71 |
| <b>Повалена Мар'яна</b><br>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРАВ ЛЮДИНИ                                                                                           | 75 |
| <b>Сабадаш Олег, Черепанин Роман</b><br>ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ SMART ДЛЯ МОНІТОРИНГУ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАУКОВОЇ РОБОТИ ПРИРОДООХОРОННИХ УСТАНОВ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ                                       | 76 |
| <b>Semak Uliana</b><br>EARTH OBSERVATION FOR BIODIVERSITY MONITORING IN AGRICULTURAL LANDSCAPES OF UKRAINE                                                                                                                        | 78 |
| <b>Сенета Мар'яна</b><br>ЗЕЛЕНІ НАНОТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ: ІНТЕГРОВАНІЙ МІЖДИСЦИПЛІНАРНИЙ ПІДХІД                                                                                                           | 81 |
| <b>Струс Юрій, Струс Василина, Скольський Ігор</b><br>BIOMON: ВІДКРИТА ВЕБ-СИСТЕМА ОБРОБКИ ДАНИХ ФОТОПАСТОК ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ССАВЦІВ У ПРИРОДНОМУ ЗАПОВІДНИКУ «РОЗТОЧЧЯ»                                                           | 85 |
| <b>Терпеливець Станіслав, Черепанин Роман</b><br>ВИКОРИСТАННЯ ПЛАТФОРМИ INATURALIST ДЛЯ РОЗВИТКУ ГРОМАДЯНСЬКОЇ НАУКИ В ПРИРОДООХОРОННИХ УСТАНОВАХ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ                                                              | 86 |
| <b>Ткачов Віталій, Рубан Ігор</b><br>ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РОБАСТНОЇ ВАРІАЦІЙНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ                                                                          | 88 |
| <b>Тріандофіліді Леонід, Черепанин Роман</b><br>КОНЦЕПЦІЯ CRM/GIS-СИСТЕМИ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИСОКОГІРНИХ ТЕРИТОРІЙ КАРПАТ                                                                           | 91 |

| <b>СЕКЦІЯ 2. БЕЗПЕКА ДОВКІЛЛЯ В УМОВАХ ВІЙНИ: ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ВИКЛИКИ СЬОГОДЕННЯ</b>                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Баран Мар'яна, Васькович Ростислав</b><br>ЦИФРОВА ПАРАДИГМА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННИХ ВИКЛИКІВ ТА ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ: ІНТЕГРОВАНІЙ ІТ-ПІДХІД                                          | 93  |
| <b>Баран Мар'яна, Мокрицька Христина</b><br>ТЕХНОЛОГІЧНА КОНВЕРГЕНЦІЯ ТА ЦИФРОВИЙ СУВЕРЕНІТЕТ ДОВКІЛЛЯ: СТРАТЕГІЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОЇ АГРЕСІЇ                                | 95  |
| <b>Баран Мар'яна, Квас Ольга</b><br>СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ХЕМОДИНАМІКА ВОЄННОГО ЕКОЦИДУ: КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ ЕКОСИСТЕМ ЧЕРЕЗ ІНТЕГРОВАНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ                                      | 97  |
| <b>Барна Остап, Петрушка Ігор</b><br>ВПЛИВ ІОНІВ КАДМІЮ НА ҐРУНТОВЕ СЕРЕДОВИЩЕ                                                                                                                                  | 99  |
| <b>Білошапка Вікторія</b><br>ПІДХОДИ ДО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ЯК СВІТОГЛЯДНА ПРОБЛЕМА СУСПІЛЬСТВА: ВИКЛИКИ СУЧАСНОСТІ                                                                                             | 101 |
| <b>Бузіна Ірина</b><br>ГІС-АНАЛІЗ ДЕГРАДАЦІЇ АГРОЛАНДШАФТІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ В УМОВАХ ВІЙНИ                                                                                               | 103 |
| <b>Даценко Людмила, Тітова Світлана, Дубницька Маргарита</b><br>ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ КОНСОЛІДАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ЗЕЛЕНОГО КУРСУ                                           | 106 |
| <b>Жураківський Валентин, Бойчук Василь, Дзендзя Андрій, Різничук Надія</b><br>БЛАКИТНО-ЗЕЛЕНА ІНФРАСТРУКТУРА ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТРУМЕНТ КЛІМАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ МІСТА ІВАНО-ФРАНКІВСЬКА | 109 |
| <b>Іваха Олег, Руда Марія</b><br>СПОСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ПИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ В ЖИТЛОВІЙ ЗАБУДОВІ                                                                                  | 113 |
| <b>Качан Сергій</b><br>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМІ ФІНАНСОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНИХ СТРУКТУР БІЗНЕСУ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД                                                             | 115 |
| <b>Кирлик Наталія</b><br>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У РОЗВИТКУ НАЦІОНАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ                                                                           | 116 |

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Королько Сергій</b><br>СУЧАСНІ ПРИРОДНІ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ УТЕПЛЮВАЧІ НА<br>ОСНОВІ КОСТРИЦІ                                                                                                                             | 118 |
| <b>Левко Анна</b><br>ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ<br>РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ПОВОЄННОМУ<br>ВІДНОВЛЕННІ                                                                                              | 120 |
| <b>Лех Галина, Васькович Христина</b><br>ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ<br>ТУРИСТИЧНОЇ СФЕРИ В УМОВАХ ВОЄННОЇ КРИЗИ                                                                                            | 123 |
| <b>Максименко Владислав, Безсонний Віталій</b><br>ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ SENTINEL-2 ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ<br>ІНДИКАЦІЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА В<br>УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ                                            | 125 |
| <b>Мельник Наталія, Різничук Надія</b><br>ФІТОХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ І БІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ МІСЦЕВИХ<br>РОСЛИН ЯК ДЖЕРЕЛО КОСМЕТИЧНИХ І ФАРМАКОЛОГІЧНИХ<br>ПРЕПАРАТІВ                                                          | 127 |
| <b>Миленька Мирослава, Цепенда Ігор, Стефанюк Роман, Наливайчук Андрій</b><br>ВИСОКОГІРНІ НАУКОВІ ХАБИ ЯК ЕЛЕМЕНТ СИСТЕМИ<br>ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА БЕЗПЕКОВОЇ СТІЙКОСТІ: РОЛЬ МННЦ<br>«ОБСЕРВАТОРІЯ» В УМОВАХ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ | 129 |
| <b>Мисик Михайло, Поберейко Богдан, Варениця Віталій</b><br>АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ<br>ІНДЕКСУ РОСЛИННОСТІ NDVI ПОСТКАТАСТРОФІЧНОЇ<br>ЕКОСИСТЕМИ                                                      | 131 |
| <b>Мушинський Володимир, Глуховецький Ярослав, Петрушка Ігор</b><br>ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ<br>ПОВІТРЯ                                                                                           | 135 |
| <b>Нестер Анатолій, Войтишина Вікторія</b><br>ВІЙСЬКОВІ ДІЇ В УКРАЇНІ ТА ЇХ НАСЛІДКИ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ                                                                                                                        | 137 |
| <b>Нижник Андрій, Партика Андрій</b><br>ПІДХОДИ ДО МІНІМІЗАЦІЇ ВТОРИННОГО ЗАБРУДНЕННЯ<br>ДОВКІЛЛЯ ПІД ЧАС ЗНЕШКОДЖЕННЯ БПЛА В УМОВАХ ВІЙНИ                                                                               | 141 |
| <b>Носок Ніколетта</b><br>КІБЕРБЕЗПЕКА ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ЯК СКЛАДОВА<br>БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ В УМОВАХ ВІЙНИ                                                                                                           | 143 |
| <b>Огразанський Владислав</b><br>РЕГУЛЯТОРНА ПОЛІТИКА ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД В<br>УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА ПІСЛЯВОЄННОГО<br>ВІДНОВЛЕННЯ                                                                                   | 144 |

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Полуйко Василь, Мельниченко Галина, Іванова Ольга</b><br>БІОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ:<br>ФОРМУВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ БАГАТОРІВНЕВОГО АЛГОРИТМУ<br>(НА ПРИКЛАДІ САВИНСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ) | 146 |
| <b>Потопник Богдан</b><br>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМІ ФІНАНСОВОГО<br>ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВ У<br>ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД                                                                               | 148 |
| <b>Прокопчук Ірина</b><br>ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЯК ЕЛЕМЕНТ НАЦІОНАЛЬНОЇ ТА<br>ГЛОБАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ: НОРМАТИВНО-ПРАВОВА ВІДПОВІДЬ НА<br>ВИКЛИКИ ПОВНОМАСШТАБНОЇ ВІЙНИ                                                          | 149 |
| <b>Роман Людмила, Лабецька Уляна</b><br>ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ НА ТЕРИТОРІЇ НПП<br>«БОЙКІВЩИНА» В УМОВАХ ВІЙНИ                                                                                                       | 153 |
| <b>Романюк Юлія, Будішевська Ольга</b><br>ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ В ДОСЛІДЖЕННІ ХІТОЗАН-<br>БЕНТОНІТОВИХ СОРБЕНТІВ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ВАЖКИХ<br>МЕТАЛІВ ІЗ СТІЧНИХ ВОД                                                            | 154 |
| <b>Сенета Зоряна</b><br>ПРОБЛЕМИ ТА НАПРЯМИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНО-<br>ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ                                                                                                             | 156 |
| <b>Соколовський Ігор, Лех Анастасія</b><br>ВПЛИВ ЕКОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ПЕРСПЕКТИВНІ<br>НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ СІМЕЙНОГО БІЗНЕСУ ПІД ЧАС ВІЙНИ                                                                               | 159 |
| <b>Трайдук Надія, Несторенко Олександр</b><br>ЗЕЛЕНА ВІДБУДОВА УКРАЇНИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ<br>ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ                                                                         | 160 |
| <b>Угрин Леся, Александер Остенда</b><br>ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА<br>ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНІВ ЕКОСИСТЕМ ТЕРИТОРІЙ ПРИРОДО-<br>ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ                                                                | 163 |
| <b>Федонюк Віталіна, Чабанчук Ірина</b><br>ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІКТ ТА ДЗЗ ПРИ АНАЛІЗІ НАСЛІДКІВ<br>ОБСТРІЛІВ СХОВИЩ ПММ                                                                                                 | 165 |
| <b>СЕКЦІЯ 3. ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ЕКОНОМІКИ В КОНТЕКСТІ<br/>ФОРМУВАННЯ ЗЕЛЕНОГО МАЙБУТНЬОГО КРАЇН<br/>ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ</b>                                                                                                    |     |
| <b>Ангелко Ірина</b><br>КЛЮЧОВІ ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ТА МЕХАНІЗМИ РЕАЛІЗАЦІЇ<br>ЗЕЛЕНОГО ПІДПРИЄМНИЦТВА ЯК ОСНОВИ ЕКОНОМІЧНОГО<br>РОЗВИТКУ                                                                                | 168 |

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Андрощук Ілона</b><br>МІЖДЕРЖАВНІ УГОДИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЛОБАЛЬНОГО ПРОДОВОЛЬЧОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ                                       | 170 |
| <b>Барсуков Родіон, Коваленко Ангеліна, Скрипник Дмитро, Халін Ігор</b><br>РОЗРОБКА RAG-СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ESG-ПОКАЗНИКІВ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ ІНВЕСТИЦІЙНИХ АКТИВІВ                     | 171 |
| <b>Hembarska Nataliia, Voloshyn Orysia, Danylkiv Khrystyna</b><br>“GREEN” FINANCIAL LITERACY AS A FACTOR IN THE GREENING OF THE ECONOMY: KEY TRENDS AND CHALLENGES                    | 173 |
| <b>Гембарська Наталія</b><br>РОЛЬ БУХГАЛТЕРА В УМОВАХ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ                                                                                      | 176 |
| <b>Євтух Любов</b><br>ТРАНСФОРМАЦІЯ ФІНАНСОВОЇ ЕКОСИСТЕМИ УКРАЇНИ НА ЗАСАДАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ                                                                                         | 179 |
| <b>Коваленко Ольга, Демчина Роман, Маєвська Оксана</b><br>АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕНЬ У СТИЧНИХ ВОДАХ, ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ НА АВТОМІЙНИХ СТАНЦІЯХ САМООБСЛУГОВУВАННЯ, ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХНЬОГО ОЧИЩЕННЯ | 181 |
| <b>Коцина Марта</b><br>ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ЕКОНОМІКИ ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ ВЕКТОР ФОРМУВАННЯ «ЗЕЛЕНОГО» МАЙБУТНЬОГО ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ                                                            | 183 |
| <b>Кудрик Роман</b><br>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ФОРМУВАННІ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД В УМОВАХ МІНЛИВОСТІ ЕКОНОМІКИ                                             | 185 |
| <b>Лапішко Марія, Лапішко Зоряна</b><br>ФІНАНСОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ                                                                           | 187 |
| <b>Луців Наталія, Капраль Андрій</b><br>ЄВРОПЕЙСЬКІ ПРАКТИКИ ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ ТА ЇХ ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ В УКРАЇНІ                                                 | 190 |
| <b>Маєвська Оксана, Винар Ірина, Кшивецький Богдан</b><br>АНАЛІЗ СТАНУ ОЧИСНИХ СПОРУД СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ВОДОВІДВЕДЕННЯ В УКРАЇНІ: ПРОБЛЕМИ, ВИКЛИКИ ТА МОЖЛИВОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ  | 194 |
| <b>Майструк Наталія</b><br>ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УКРАЇНІ                                                                                               | 196 |

|                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Македон Павло</b><br>ІНСТИТУЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ ВЗАЄМОДІЇ МІСЦЕВИХ ОРГАНІВ<br>ВЛАДИ: ПОЛЬСЬКИЙ ДОСВІД ТА МОЖЛИВОСТІ ЙОГО<br>АДАПТАЦІЇ В УКРАЇНІ                                                                                   | 200 |
| <b>Мокрицька Віра</b><br>ЦИФРОВІЗАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПРАВА ТА РОЛЬ ENGLISH FOR<br>SPECIFIC PURPOSES (ESP) У ФОРМУВАННІ ЄДИНОГО ЗЕЛЕНОГО<br>ПРОСТОРУ ЄС                                                                             | 201 |
| <b>Носова Наталія</b><br>ВПЛИВ ІНТЕГРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОГО<br>ЗЕЛЕНОГО КУРСУ НА РЕФОРМУВАННЯ ПРАВОВОЇ СИСТЕМИ<br>УКРАЇНИ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЮ ЕКОНОМІКИ (НА ПРИКЛАДІ<br>АГРОПРОДОВОЛЬЧОГО СЕКТОРУ)                        | 203 |
| <b>Олексюк Ганна, Попадинець Назарій</b><br>СПРАВЕДЛИВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ВУГІЛЬНИХ РЕГІОНІВ ЯК<br>ІНСТРУМЕНТ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО ЗБАЛАНСОВАНОГО<br>ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО РОЗВИТКУ (НА ПРИКЛАДІ<br>ЛЬВІВСЬКОГО МІКРОРЕГІОНУ)        | 207 |
| <b>Пелещак Олег</b><br>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-<br>ЕКОНОМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ САНАЦІЇ ПІДПРИЄМСТВ В<br>УМОВАХ ЕКОНОМІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ                                                          | 209 |
| <b>Рябоконт Альона, Новак Олена</b><br>ВПЛИВ МІЖНАРОДНИХ БІЗНЕС-ІНСТИТУЦІЙ НА ЕКОЛОГІЗАЦІЮ<br>ПІДПРИЄМНИЦТВА В КРАЇНАХ ЄС: ДОСВІД МІЖНАРОДНОЇ<br>ТОРГОВОЇ ПАЛАТИ                                                                 | 211 |
| <b>Sadura Oksana, Agres Oksana</b><br>FINANCIAL SUPPORT FOR THE ECOLOGIZATION OF THE<br>ECONOMIES OF UKRAINE'S REGIONS AS A FACTOR IN SHAPING A<br>“GREEN” FUTURE FOR THE COUNTRIES OF THE EUROPEAN UNION                        | 214 |
| <b>Сиса Владислав, Яковенко Євгенія</b><br>ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВБУДОВАНОГО МАШИННОГО<br>НАВЧАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДЕГРАДАЦІЇ МЕМБРАНИ<br>ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ ЯК ПЕРЕДУМОВА ЗМЕНШЕННЯ ОБСЯГУ<br>ВІДХОДІВ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ | 217 |
| <b>Тимкович Оксана</b><br>АДАПТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ВІДТВОРЕННЯ ЛЮДСЬКОГО<br>КАПІТАЛУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД                                                                                                                      | 219 |
| <b>Худецький Богдан, Клід Віктор</b><br>ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ У<br>НАФТОГАЗОВИДОБУВНІЙ ГАЛУЗІ ЧЕРЕЗ ІНТЕГРАЦІЮ<br>БІОІНДИКАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ У СИСТЕМУ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА<br>ДОВКІЛЛЯ                          | 221 |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Щербан Ореста, Щербан Тарас, Квасній Любов</b><br>ЦИФРОВІЗАЦІЯ ТУРИСТИЧНОЇ ІНДУСТРІЇ ЯК ЧИННИК СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ               | 223 |
| <b>СЕКЦІЯ 4. ТЕХНОЛОГІЇ ІМЕРСИВНОЇ ТА РОЗШИРЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ</b>                                                                   |     |
| <b>Басала Валентин</b><br>ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ                                                                        | 226 |
| <b>Kliuchak Olha, Shevtsiv Nikita</b><br>THE DOUBLE-EDGED SWORD: AI'S ROLE IN BOTH CAUSING AND SOLVING THE CLIMATE CRISIS                                                      | 227 |
| <b>Назаркевич Оксана</b><br>ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ В АГРОСЕКТОРІ ЯК ЧИННИК ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ ТА МІНІМІЗАЦІЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ | 232 |
| <b>Рогальова Вероніка, Марікуца Уляна</b><br>ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ МІСЬКОЇ ЕКО-ІНФРАСТРУКТУРИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕТЕРОГЕННИХ МОДЕЛЕЙ ТА AR-ВІЗУАЛІЗАЦІЇ                        | 233 |
| <b>Теницька Ірина, Самусевич Ярина</b><br>МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ: ВІД НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО АНАЛІЗУ ДО КОГНІТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ       | 237 |
| <b>Трусевич Оксана, Гембара Тарас</b><br>АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МОНІТОРИНГУ ГЛОБАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ CO <sub>2</sub> ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ З ЯДРОМ ПАМ'ЯТІ                   | 239 |

## **СЕКЦІЯ 1. СВІТОВА ТА ВІТЧИЗНЯНА ПРАКТИКА ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ДОВКІЛЛЯ**

**Баран Мар'яна**  
*Національний університет «Львівська політехніка»*  
**Купранець Наталія, Купранець Роман**  
*Стрийський ліцей №6*

### **ДИДАКТИЧНА КОНВЕРГЕНЦІЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ ТА МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ У ВИКЛАДАННІ ГЕОГРАФІЧНИХ ДИСЦИПЛІН: СТРАТЕГІЯ ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНЦІЙ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ**

Сучасна парадигма географічної освіти в Україні зазнає радикальної трансформації, перетворюючись із дескриптивного вивчення природних зон на прикладну дисципліну просторового аналізу та оперативного моніторингу. В умовах повномасштабної збройної агресії викладання географії у закладах середньої та вищої освіти набуває стратегічного статусу, оскільки формування у здобувачів освіти навичок роботи з геоінформаційними системами (ГІС) та даними дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стає фундаментом для майбутньої фіксації екоциду та повоєнного відновлення територій. Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю імплантації високотехнологічних інструментів екологічного моніторингу безпосередньо у навчальний процес, що дозволить підготувати фахівців, здатних оперувати динамічними даними за стандартами Європейського Союзу. Метою роботи є обґрунтування методичної моделі інтегрованого викладання географії, де ІТ-інструментарій виступає ядром формування екологічної свідомості та професійної придатності в умовах глобальних воєнних загроз.

Перехід від статичних картографічних матеріалів до динамічного супутникового моніторингу у шкільній та університетській програмах є першочерговим викликом для сучасної дидактики. Війна спричинила деформацію ландшафтів України, яка потребує візуалізації через інструменти хмарних обчислень, такі як Google Earth Engine або Sentinel Hub. На шкільному рівні це дозволяє учням порівнювати багаточасові супутникові знімки «до» та «після» бойових дій, що не лише демонструє масштаби антропогенного впливу, а й виховує критичне сприйняття інформації через пряму роботу з першоджерелами космічних даних [1]. На університетському рівні вивчення географії має зміщуватися в площину цифрового дешифрування зон забруднення та автоматизованого підрахунку втрат лісового фонду. Студенти-географи повинні оволодіти алгоритмами ідентифікації змін берегової лінії та деградації екосистем унаслідок техногенних катастроф воєнного походження, що перетворює навчальну діяльність на реальне наукове дослідження з високим ступенем суспільної значущості.

Геоінформаційні системи, зокрема QGIS та ArcGIS, у контексті викладання екологічних дисциплін мають сприйматися як базова мова забезпечення національної безпеки. Методика викладання повинна відходити від репродуктивного вивчення інструментарію до розв'язання ситуаційних кейсів «воєнної екології». Навчальні завдання, що базуються на реальних масивах даних про мінну небезпеку або локалізацію стихійних сміттєзвалищ знищеної військової техніки, дозволяють студентам створювати складні багатопланові цифрові карти екологічних ризиків [2]. Здатність поєднувати гідрографічні шари з картами зон бойових дій дає можливість моделювати шляхи міграції токсичних речовин у річкових басейнах, що є критично важливим для розуміння транскордонної екологічної безпеки в межах European Green Deal. Таким чином, ГІС-технології у навчальному процесі трансформуються з предмета вивчення на інструмент прийняття стратегічних рішень.

Екологізація освіти в контексті формування «зеленого» майбутнього країн ЄС вимагає від географічної науки підготовки молоді до функціонування в умовах циркулярної економіки. Навчальні програми мають інтегрувати концепції розрахунку вуглецевого сліду та екологічної ємності ландшафтів через призму ІТ-моделювання. Вивчення «розумних міст» (Smart City) у курсах соціально-економічної географії повинно демонструвати, як цифрові двійники міських територій допомагають оптимізувати енергоспоживання та управління відходами у районах, що постраждали від обстрілів. Крім того, критичного значення набуває англомовний компонент (ESP), оскільки міжнародна співпраця з Європейським агентством довкілля (EEA) вимагає володіння фаховою термінологією та інтерфейсами глобальних моніторингових систем [3]. Це створює міждисциплінарне середовище, де географія інтегрується з лінгвістикою, правом та комп'ютерними науками.

Важливим аспектом сучасної географічної освіти є психолого-педагогічна складова висвітлення екологічних наслідків війни. Навчальні матеріали не повинні обмежуватися констатацією руйнувань, що може спричинити когнітивний дисонанс у здобувачів освіти. Акцент має бути зміщений на проєктування відновлення: від візуалізації трагедії до генерації рішень. Лабораторні роботи з моделювання «зелених» кварталів на місці зруйнованих промислових зон за допомогою архітектурних ГІС-плагінів дозволяють студентам побачити перспективу розвитку. Розвиток громадянської науки (Citizen Science) через використання мобільних додатків типу «ЕкоЗагроза» у навчальному процесі залучає студентську молодь до краудсорсингового збору екологічних даних у своїх регіонах. Це формує активну громадянську позицію та розуміння того, що цифрові дані є інструментом боротьби за екологічну справедливість у правовому полі.

Професійна підготовка географів-екологів у вищій школі має бути максимально адаптована до потреб державного управління та міжнародного права. Майбутні фахівці повинні володіти методами цифрового документування збитків, які відповідають стандартам верифікації супутникової інформації та вимогам міжнародних юридичних інстанцій. Це потребує глибокого вивчення стандартів метаданих та принципів кібербезпеки екологічних реєстрів. Використання ШІ-алгоритмів для прогнозування самовідновлення екосистем дозволяє студентам проводити сценарний аналіз: визначати території, що потребують негайної рекультиваци, та ті, де доцільно впроваджувати стратегію ренатуралізації. Таке прогностичне моделювання робить випускника ЗВО конкурентоспроможним аналітиком, здатним працювати на межі екологічного аудиту та державного планування.

Інтеграція України до європейського освітнього та наукового простору вимагає використання платформ типу Copernicus Academy для обміну досвідом у сфері космічних технологій. Викладання географії має стати точкою перетину екології, права та ІТ, де цифрові дані є сполучною ланкою між теорією та практикою. Оновлення державних стандартів освіти шляхом впровадження обов'язкових модулів з геоінформаційного моніторингу воєнних наслідків є критичним кроком для забезпечення національної безпеки. Технічне забезпечення навчальних закладів доступом до ліцензійного ПЗ та платних супутникових сервісів повинно розглядатися як інвестиція в інтелектуальний капітал країни, здатний захистити природні ресурси через цифрову перевагу.

Підсумовуючи, слід зазначити, що інформаційні технології у викладанні географії – це не просто засіб візуалізації, а фундаментальний метод формування нового покоління експертів, здатних оцінити, захистити та відновити довкілля України. Синергія ДЗЗ, ГІС та екологічного права у навчальному процесі дозволяє перетворити освітній простір на полігон для розробки стратегій сталого розвитку. Тільки через глибоку цифровізацію географічної освіти Україна зможе підготувати фахівців, здатних не лише фіксувати екоцид, а й будувати нову, екологічно безпечну та технологічно розвинену державу в межах глобальної «зеленої» трансформації. Повоєнна освіта має стати інтелектуальною відповіддю на воєнні виклики, де кожна цифрова карта та супутниковий знімок є кроком до відновлення природного суверенітету та сталого майбутнього.

1. Livingstone, S. (2012). Critical reflections on the benefits of ICT in education. *Oxford Review of Education*. [https://www.researchgate.net/publication/232939736\\_Critical\\_Reflections\\_on\\_the\\_Benefits\\_of\\_ICT\\_in\\_Education](https://www.researchgate.net/publication/232939736_Critical_Reflections_on_the_Benefits_of_ICT_in_Education)
2. Militino, A. F., et al. (2021). Teaching GIS and remote sensing in the era of big data. *International Journal of Digital Earth*. [https://www.researchgate.net/publication/388761661\\_Remote\\_Sensing\\_and\\_Geospatial\\_Analysis\\_in\\_the\\_Big\\_Data\\_Era\\_A\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/388761661_Remote_Sensing_and_Geospatial_Analysis_in_the_Big_Data_Era_A_Survey)
3. European Commission. (2022). *Learning for environmental sustainability: Commission proposal for a Council recommendation*. <https://education.ec.europa.eu/news/learning-for-the-green-transition-and-sustainable-development>

**Безсонний Віталій**  
*Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця*  
*Харківський національний університет радіоелектроніки*

## **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД**

Якість поверхневих вод є одним із ключових індикаторів екологічної безпеки територій, оскільки зміни гідрохімічних і фізико-хімічних показників відображають вплив природних процесів, господарського навантаження, урбанізації та кліматичних чинників. Наявність багаторічного масиву даних моніторингу річок і озер за 2003–2025 рр. створює передумови для переходу від описової оцінки стану водних об'єктів до прогнозного інтелектуального аналізу. У цьому контексті актуальним є порівняльне дослідження алгоритмів машинного навчання, здатних моделювати нелінійні залежності, сезонні коливання, часові лаги та взаємодію між показниками якості води.

Метою роботи є розроблення та апробація методики порівняльного оцінювання алгоритмів машинного навчання для прогнозування показників якості поверхневих вод за даними багаторічного екологічного моніторингу. Об'єктом дослідження є часові ряди спостережень за якістю води у поверхневих водних об'єктах. Предметом дослідження є моделі машинного навчання та метрики їхньої прогностичної ефективності у задачах передбачення значень окремих показників якості води або інтегрального індексу стану водного об'єкта.

Вхідний набір даних доцільно подати у вигляді структурованої таблиці, де кожний запис відповідає певному пункту моніторингу, даті спостереження та набору показників якості води. До потенційних предикторів можуть належати рН, температура води, розчинений кисень, біохімічне та хімічне споживання кисню, амонійний азот, нітрати, нітроти, фосфати, мінералізація, завислі речовини та інші показники, наявні у базі моніторингу. Для підвищення інформативності даних передбачається формування часових ознак: рік, місяць, сезон, номер кварталу, лагові значення цільового показника, ковзні середні та відхилення від багаторічного середнього рівня.

Попередня обробка даних має охоплювати уніфікацію одиниць вимірювання, перевірку дублювання записів, аналіз пропущених значень, виявлення грубих помилок і нормалізацію ознак для алгоритмів, чутливих до масштабу. Для пропусків можуть застосовуватися інтерполяція часових рядів, медіанне заповнення в межах одного водного об'єкта або модельна імпутація. Особливу увагу слід приділити хронологічному поділу вибірки: навчання моделі на ранніх роках спостережень, валідація на проміжному часовому інтервалі та тестування на найновіших даних. Такий підхід зменшує ризик витоку інформації з майбутнього та краще імітує практичну задачу прогнозування.

Для порівняння запропоновано використати шість груп моделей. Лінійна регресія розглядається як базова модель, що дає змогу оцінити мінімальний рівень якості прогнозу та

інтерпретувати напрям впливу окремих ознак. Random Forest є ансамблевим методом, який поєднує багато дерев рішень і підвищує стійкість прогнозування за рахунок усереднення результатів [1]. Gradient Boosting формує послідовність слабких моделей, кожна з яких коригує помилки попередньої, що робить його придатним для моделювання складних нелінійних закономірностей [2]. XGBoost реалізує оптимізовану схему градієнтного бустингу з регуляризацією та ефективною обробкою розріджених даних [3]. CatBoost є перспективним для екологічних наборів даних, де поряд із числовими показниками можуть бути категоріальні ознаки, зокрема назва басейну, пункту моніторингу або типу водного об'єкта [4]. LSTM-мережі доцільно застосовувати для рядів із вираженою часовою залежністю, оскільки вони спеціально розроблені для врахування довготривалої пам'яті у послідовностях [5].

Оцінювання якості прогнозування пропонується здійснювати за кількома метриками: MAE, RMSE,  $R^2$  та MAPE. MAE характеризує середню абсолютну помилку прогнозу в одиницях вимірювання цільового показника, RMSE сильніше штрафувє великі помилки,  $R^2$  відображає частку поясненої дисперсії, а MAPE дає відносну оцінку похибки у відсотках. Одночасне використання цих метрик є важливим, оскільки окремі показники якості води можуть мати різний масштаб, асиметричний розподіл і нерівномірну мінливість у часі. Для коректного порівняння моделей доцільно застосовувати не випадкове перемішування спостережень, а часову або блокову крос-валідацію.

Рейтинг моделей може формуватися за інтегральним балом, який враховує місце моделі за кожною метрикою. Для метрик MAE, RMSE і MAPE кращою є менша величина, для  $R^2$  – більша. Після нормування показників або присвоєння рангових балів формується узагальнена таблиця результатів, у якій для кожної моделі зазначаються середні значення метрик на тестовій вибірці, стійкість результатів для різних водних об'єктів і обчислювальна складність. Такий підхід дає змогу визначити не лише формально найточнішу модель, а й модель, придатну для практичного застосування в інформаційних системах екологічного моніторингу.

Очікується, що лінійна регресія виконуватиме роль інтерпретованого базового орієнтира, тоді як ансамблеві методи на основі дерев рішень забезпечуватимуть вищу точність для нелінійних залежностей між показниками. LSTM може демонструвати переваги за умови достатньої регулярності та повноти часових рядів, але потребує більшої кількості даних, ретельного налаштування гіперпараметрів і вищих обчислювальних витрат. Тому остаточний вибір моделі має базуватися не лише на мінімальній похибці, а й на стабільності, інтерпретованості, вимогах до даних і можливості впровадження в реальний процес моніторингу.

Наукова новизна дослідження полягає у формуванні відтворюваного протоколу порівняльного оцінювання моделей машинного навчання для прогнозування якості поверхневих вод на основі багаторічного моніторингового набору даних. Практичне значення полягає у можливості використання отриманого рейтингу моделей для створення програмного модуля підтримки прийняття рішень, раннього попередження про погіршення стану води та планування пріоритетних напрямів екологічного контролю.

Таким чином, порівняльний аналіз Linear Regression, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, CatBoost і LSTM дає змогу обґрунтувати вибір оптимального алгоритму для прогнозування якості поверхневих вод. Запропонована структура дослідження поєднує етапи підготовки даних, побудови моделей, оцінювання за кількома метриками та формування рейтингу, що відповідає логіці прикладного інтелектуального аналізу даних у сфері захисту довкілля.

1. Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

2. Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. The Annals of Statistics, 29(5), 1189–1232. <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>

3. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 785–794). <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
4. Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: Unbiased boosting with categorical features. In Advances in Neural Information Processing Systems, 31.
5. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. Neural Computation, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>

**Береза Олександр, Даценко Людмила, Коляда Єгон**  
*Київський національний університет імені Тараса Шевченка*

## **ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ТРАНСПОРТНО-ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ НА ОСНОВІ QGIS**

Моніторинг ризиків транспортної інфраструктури традиційно зосереджений на оцінці зв'язності мережі та часу відновлення після руйнівних подій - підтоплень, паводків, техногенних аварій [1]. Водночас ширший контекст залишається поза увагою: транспортний сектор є одним із головних антропогенних джерел NO<sub>2</sub>, CO та дрібнодисперсних частинок PM<sub>2.5</sub>, що безпосередньо погіршують якість атмосферного повітря у прилеглих до магістралей зонах [2]. Сьогодні великі європейські компанії зобов'язані детально звітувати про свій вплив на довкілля відповідно до нових стандартів ЄС (зокрема, директиви CSRD). Через це екологічні показники в логістиці стають не менш важливими за економічні. Для України це має особливе значення: щоб наші перевізники могли без перешкод працювати на європейському ринку, вони мають документально підтверджувати екологічність своїх маршрутів. Це створює гостру потребу в доступних програмах, які дозволяють автоматично розраховувати рівень забруднення та оцінювати стан прилеглих територій. [3]

Систематичний огляд відкритих інструментів для географічного аналізу транспортних систем засвідчує, що інтеграція мережевого аналізу з екологічним моніторингом залишається нерозвиненим напрямом: переважна більшість існуючих рішень розв'язують або задачу транспортної вразливості, або задачу картографування забруднення - але не обидві одночасно в межах єдиного автоматизованого конвеєра [4]. Наявні ГІС-інструменти для оцінки вразливості транспортних мереж, зокрема Network-risk [1], орієнтовані виключно на фізичну зв'язність і не враховують накопиченого екологічного впливу логістичних операцій. Саме ця прогалина є відправною точкою нашого дослідження.

У рамках дослідження запропоновано архітектуру спеціалізованого QGIS-плагіна, що поєднує три аналітичні модулі. Перший - мережевий: автоматизований імпорт і актуалізація топології транспортної мережі з OpenStreetMap [5] та ізохронний аналіз через Openrouteservice [6] для виявлення вузлів вразливості та зон транспортної недоступності при різних сценаріях блокування. Метод ізохронного аналізу дозволяє визначати, яка частка критичної інфраструктури - лікарень, складів, розподільних центрів - опиняється поза зоною транспортної доступності при виведенні з ладу ключових вузлів або ділянок мережі. Другий - екологічний: завантаження та зональна обробка супутникових растрів атмосферного забруднення (NO<sub>2</sub> із Sentinel-5P/TROPOMI) і вегетаційних індексів (NDVI на основі Sentinel-2) для оцінки хронічного впливу транспортного навантаження. Третій - модуль агрегації: розрахунок інтегрованого транспортно-екологічного індексу ризику (TEEIP) на рівні сегментів мережі з нормалізацією різнорідних показників і можливістю задавати регіонально обґрунтовані вагові коефіцієнти.

Екологічна компонента TEEIP базується на двох незалежних джерелах дистанційного зондування. Sentinel-5P/TROPOMI надає щоденні глобальні карти концентрацій NO<sub>2</sub> з

просторовою роздільністю  $3,5 \times 5,5$  км і є визнаним інструментом виявлення транспортних та промислових викидів [2]. Наявні дослідження підтверджують, що TROPOMI здатний розрізняти окремі великі автомагістралі, порти та промислові комплекси [8]. Оскільки просторова розрізненість пікселя перевищує ширину окремого транспортного коридору, атрибуція викидів доповнюється метеорологічними даними та наземними вимірами якості повітря. Паралельно Sentinel-2 забезпечує регулярні знімки з роздільністю 10 м і 5-денним циклом оновлення [9], на основі яких розраховується NDVI - нормалізований різницевий вегетаційний індекс, що слугує довгостроковим індикатором деградації рослинного покриву поблизу магістралей. Завантаження, атмосферна корекція та обробка знімків обох місій автоматизовані через наявні Python-інструменти у QGIS [10], що дозволяє будувати часові серії забруднення без ручних операцій.

Для підвищення обчислювальної ефективності моніторингу пропонується впровадження просторових індексів R-Tree (через клас QgsSpatialIndex), що дозволяє радикально прискорити зональну агрегацію растрових даних на масштабних транспортних мережах. Додатково запропоновано механізм пакетного сценарного моделювання, який забезпечує ітеративну перевірку варіантів блокування вузлів мережі без надлишкового рендерингу вихідних даних. Досвід розробки аналогічних PyQGIS-інструментів для автоматизованої обробки супутникових знімків засвідчує, що пакетне виконання операцій у Processing Framework забезпечує приріст швидкості порівняно з ручними процедурами, що є критично важливим при щоденному або щотижневому оновленні даних моніторингу. [11]

Відкрита архітектура платформи є принциповою перевагою запропонованого підходу. QGIS розповсюджується за ліцензією GNU GPL і не накладає обмежень на розгортання в дослідницьких установах, органах місцевого самоврядування та організаціях екологічного нагляду [7]. OpenStreetMap забезпечує актуальну і детальну базу транспортної мережі для будь-якого регіону без ліцензійних витрат [5], тоді як супутники Copernicus надають безкоштовний доступ до атмосферних і багатоспектральних даних. Поєднання цих ресурсів усуває необхідність у дорогих комерційних платформах. У широкому систематичному огляді відкритих ГІС-інструментів для транспортного планування встановлено, що рішення на базі QGIS утворюють різноманітну та динамічну екосистему, здатну конкурувати з комерційними продуктами у задачах транспортної географії [4].

Перспективним розширенням є інтеграція генеративного ШІ у процес формування геообробних процедур. Концепція автономних ГІС, у якій великі мовні моделі (LLM) самостійно генерують і виконують аналітичні конвеєри на основі текстового опису задачі [12], відкриває можливість динамічного адаптування параметрів TEEIP до змінних умов моніторингу без модифікації коду. Цей підхід вже частково реалізований в екосистемі QGIS: плагін IntelliGeo генерує PyQGIS-скрипти або графічні моделі Processing за природномовним запитом [7].

Запропонований підхід заповнює виявлену прогалину між мережевим аналізом і екологічним моніторингом. На відміну від існуючих рішень, що розв'язують ці задачі окремо, TEEIP агрегує показники транспортної доступності, атмосферного забруднення та стану рослинного покриву в єдиний просторовий індикатор - придатний для регулярного оновлення, регіонального калібрування та інтеграції у системи підтримки прийняття рішень у сфері сталої логістики та захисту довкілля. Детальний опис методики, програмної архітектури та результатів апробації представлено в основній статті авторів.

1. Toma-Danila, D., Armas, I., & Tiganescu, A. (2020). Network-risk: An open GIS toolbox for estimating the implications of transportation network damage due to natural hazards, tested for Bucharest, Romania. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1421–1439. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1421-2020>

2. van Geffen, J., Van Roozendaal, M., Hendrick, F., Mahieu, E., De Smedt, I., Stavrakou, T., Theys, N., Vlietinck, J., Tack, F., & Boersma, K. F. (2022). Sentinel-5P TROPOMI NO<sub>2</sub> retrieval:

- Impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(7), 2037–2060. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022>
3. Zeng, H., Li, R. Y. M., & Zeng, L. (2022). Evaluating green supply chain performance based on ESG and financial indicators. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 982828. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.982828>
4. Lovelace, R. (2021). Open source tools for geographic analysis in transport planning. *Journal of Geographical Systems*, 23(4), 547–578. <https://doi.org/10.1007/s10109-020-00342-2>
5. OpenStreetMap contributors. (2024). OpenStreetMap [Map database]. Open Data Commons Open Database Licence. <https://www.openstreetmap.org>
6. Openrouteservice Team. (2024). Openrouteservice: Open-source route planning. HeiGIT gGmbH. <https://openrouteservice.org>
7. QGIS Development Team. (2024). QGIS geographic information system. Open Source Geospatial Foundation. <https://qgis.org>
8. Morales Rincón, H., González Casado, G., González, R. M., & Rodríguez, E. (2023). Evaluation of the potential of Sentinel-5P TROPOMI and AIS marine traffic data for the monitoring of anthropogenic activity and maritime transport NO<sub>x</sub>-emissions in Canary Islands waters. *Sustainability*, 15(5), 4632. 8
9. Lee, J., Lim, J., Lee, J., Park, J., & Won, M. (2024). Ground-based NDVI network: Early validation practice with Sentinel-2 in South Korea. *Sensors*, 24(6), 1892. <https://doi.org/10.3390/s24061892>
10. Congedo, L. (2021). Semi-automatic classification plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 3172. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
11. Marzouki, A., & Dridri, A. (2024). PyGeoRS: A QGIS plugin for automating Landsat data processing in environmental mapping. *Earth Science Informatics*, 18, 58. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01522-0>
12. Li, Z., Ning, H., Gao, S., Janowicz, K., Li, W., Arundel, S. T., Yang, C., Bhaduri, B., Wang, S., Zhu, A.-X., Gahegan, M., Shekhar, S., Ye, X., McKenzie, G., Cervone, G., & Hodgson, M. E. (2025). GIScience in the era of artificial intelligence: A research agenda towards autonomous GIS. *Annals of GIS*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.23633>

**Вінтоняк Віталій**

*Карпатський національний університет імені Василя Стефаника*

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЦИФРОВІЗАЦІЇ ПУБЛІЧНО-АДМІНІСТРАТИВНИХ ПОСЛУГ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ**

У сучасних умовах цифрової трансформації публічного управління інформаційні технології набувають особливого значення не лише як інструмент підвищення ефективності надання публічно-адміністративних послуг, але і як важливий механізм забезпечення екологічної безпеки та раціонального природокористування. Інтеграція цифрових платформ, систем електронного врядування та інформаційно-аналітичних сервісів у діяльність органів державної влади й місцевого самоврядування сприяє формуванню сучасної моделі управління, орієнтованої на прозорість, оперативність, екологічну відповідальність та сталий розвиток територій. У цьому контексті цифровізація публічно-адміністративних послуг виступає важливим чинником мінімізації екологічних ризиків через скорочення паперового документообігу, оптимізацію управлінських процесів та зменшення ресурсомісткості адміністративних процедур.

Особливого значення набуває впровадження цифрових технологій у сфері екологічного моніторингу та управління природними ресурсами. Використання геоінформаційних систем, хмарних платформ, технологій Big Data, Інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту дає можливість здійснювати оперативний контроль за станом довкілля, аналізувати рівень забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів і ґрунтів, прогнозувати екологічні ризики та формувати інформаційну базу для прийняття управлінських рішень [1]. У системі публічного управління такі технології інтегруються з цифровими сервісами органів влади, що дозволяє забезпечити швидке реагування на екологічні загрози та підвищити ефективність комунікації між державою, громадою і бізнесом.

В умовах розвитку електронного врядування цифровізація адміністративних послуг у сфері екології проявляється через створення електронних платформ подання екологічної звітності, онлайн-систем отримання дозволів і ліцензій, електронних реєстрів природних ресурсів, цифрових карт територіального планування та платформ відкритих екологічних даних. Такі сервіси сприяють підвищенню прозорості діяльності органів влади, зменшенню корупційних ризиків та забезпеченню відкритого доступу населення до інформації про стан навколишнього середовища [2]. Водночас автоматизація процесів обробки даних дозволяє скоротити часові та фінансові витрати на надання публічно-адміністративних послуг.

На рівні територіальних громад цифрові технології створюють передумови для формування інтегрованих систем управління екологічною безпекою та просторовим розвитком. Використання цифрових платформ у діяльності органів місцевого самоврядування забезпечує можливість здійснення моніторингу стану інфраструктури, управління відходами, контролю за використанням земельних ресурсів і реалізації концепції «розумного міста». У поєднанні з електронними сервісами публічного управління це сприяє формуванню ефективної моделі цифрової екосистеми територіальної громади, орієнтованої на екологічну стійкість та підвищення якості життя населення.

Водночас впровадження цифрових технологій у сферу публічно-адміністративних послуг та екологічного управління супроводжується низкою викликів, серед яких недостатній рівень цифрової інфраструктури окремих територій, нерівномірність доступу населення до цифрових сервісів, ризики кіберзагроз і потреба у захисті персональних та екологічних даних [3]. Це потребує вдосконалення нормативно-правового забезпечення цифрової трансформації, розвитку цифрових компетентностей працівників органів влади та населення, а також формування комплексної системи інформаційної безпеки.

Отже, цифровізація публічно-адміністративних послуг у поєднанні з використанням інформаційних технологій у сфері захисту довкілля формує нову модель управління, засновану на інтеграції цифрових інструментів, відкритих даних та сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Її реалізація сприяє підвищенню ефективності публічного управління, забезпеченню екологічної безпеки, оптимізації використання ресурсів та формуванню умов для сталого розвитку територіальних громад і держави загалом.

1. Осадчий, А. (2023). Цифровізація адміністративних процедур. *Проблеми законності*, 163, 229–247.

2. Краковська, А. Є., & Бабик, М. К. (2022). Цифровізація адміністративних послуг в Україні: проблеми та перспективи розвитку. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*, 70, 329–334. DOI: doi.org/10.24144/2307-3322.2022.70.52

3. Прокопенко, С. Л. (2024). Проблеми та перспективи цифровізації адміністративних послуг в Україні. *Інвестиції: практика та досвід*, 12, 235–240. DOI: doi.org/10.32702/2306-6814.2024.12.235.

## **INFORMATION TECHNOLOGIES IN CITIZEN SCIENCE: INDEPENDENT GROUNDWATER MONITORING IN THE CONTEXT OF THE EU NITRATES DIRECTIVE IMPLEMENTATION IN UKRAINE**

The Association Agreement between Ukraine and the EU obliges Ukraine to implement Council Directive 91/676/EEC (the Nitrates Directive) [1] to protect water from agricultural nitrate pollution. Monitoring is particularly urgent because over 75% of Ukraine's rural population relies on decentralized water sources such as wells and springs [2]. State sanitary monitoring has been virtually non-existent for a long time, especially since the beginning of the war. Official reports often rely on averaged statistics, which conceal localized environmental disasters.

The primary requirement for implementing the Nitrates Directive is the designation of Nitrate Vulnerable Zones (NVZs). This process requires a robust network of monitoring wells and regular sampling. For instance, Germany maintains a specialized EU-Nitratmessnetz system, which included 692 regularly monitored wells as of 2024 [3]. Proportionally, Ukraine needs at least 700-800 monitoring stations.

In addition, now official statistics on decentralized water supplies and related non-infectious illnesses, specifically methemoglobinemia caused by nitrate acute poison, are virtually non-existent. Furthermore, centralized water systems do not guarantee safety. For example, in 2024, the Ros' River, which supplies cities such as Bila Tserkva, Bohuslav, and Korsun-Shevchenkivskiy, showed significant levels of organic and biogenic pollution. Ammonium ions reached 0.36-5.33 mg/dm<sup>3</sup> (exceeding the 1.28 mg/dm<sup>3</sup> limit), and nitrate levels peaked at 51.46 mg/dm<sup>3</sup> (surpassing the 50 mg/dm<sup>3</sup> threshold). While nitrogen pollutants from municipal wastewater can be estimated (approximately 4.32 thousand tons of ammonium nitrogen and 35.71 thousand tons of nitrates), nitrate runoff from agricultural sources remains entirely unmonitored and unregulated.

What open database of nitrate pollution is currently available in Ukraine? In fact, we obtained the following data of National Report on the Quality of Drinking Water and the State of Drinking Water Supply and Wastewater Disposal in Ukraine for 2024 [2, p. 118] only.

Table 1. Percentage of non-standard drinking water samples from non-centralized water supply sources by nitrate content, according to the Central Water Quality Control Centre

Table 1

| Type of drinking water source | Percentage of non-standard samples by year (%) |      |      |      |
|-------------------------------|------------------------------------------------|------|------|------|
|                               | 2021                                           | 2022 | 2023 | 2024 |
| Non-centralized (total)       | 24.0                                           | 24.6 | 23.9 | 24.2 |
| Dug wells                     | 28.5                                           | 29.4 | 29.7 | 29.8 |
| - public                      | 36.5                                           | 38.2 | 37.9 | 38.5 |
| - private                     | 26.1                                           | 22.7 | 25.6 | 26.2 |
| Spring catchments (total)     | 13.4                                           | 14.7 | 12.9 | 10.4 |
| - public                      | 17.5                                           | 16.6 | 14.7 | 12.3 |
| Artesian wells                | 12.0                                           | 8.2  | 10.2 | 9.8  |

The statistical data presented in Table 1 serve as a critical baseline for implementing the EU Nitrates Directive, but they also highlight a significant “information gap” that information technologies (IT) and citizen science are uniquely positioned to bridge.

*Citizen Science as a Tool for Granular Data Collection.* The table shows that nearly 30% of dug wells and 38.5% of communal sources exceed nitrate safety limits. In rural areas, where government monitoring is often sporadic, citizen science can transform residents from passive

consumers into active “sensors”. By using low-cost testing kits and reporting results through mobile platforms, citizens can provide the high-density data needed to identify pollution hotspots that official reports (like Table 1) aggregate and obscure. A major challenge in independent monitoring is ensuring that “non-standard samples” are recorded accurately.

Modern IT frameworks allow the integration of AI-driven image recognition in mobile apps to interpret colorimetric test strips. This minimizes human error and ensures that data collected by non-professionals are standardized, verifiable, and compatible with EU reporting requirements.

The primary limitation of Table 1 is the absence of spatial data, which makes it impossible to designate Nitrate Vulnerable Zones (NVZs). By integrating these statistical percentages into Geographic Information Systems (GIS), we can overlay pollution data with land-use maps, livestock density data, and soil types. Only through such IT-enabled visualization can we establish a causal link between agricultural activities and the 38.5% contamination rate observed in communal wells.

The Directive requires not only monitoring but also public consultation and action. IT platforms can serve as a bridge, transforming the data from Table 1 from a “static report” into a dynamic risk map accessible to the public. This transparency empowers local communities to advocate for better agricultural practices and provides the legal evidence base needed for the formal implementation of the Nitrates Directive.

Thus, Table 1 illustrates the “information bottleneck” of traditional monitoring. While it identifies a public health crisis, it lacks the resolution needed for regulatory action. The implementation of the EU Nitrates Directive therefore depends on a paradigm shift: leveraging citizen science for mass data acquisition and information technologies to transform that data into actionable environmental policy.

Currently, there are several successful attempts by non-governmental organizations (WaterNet, NGO Ecoaction) to create nitrate pollution maps of Ukraine. For example, the figure below presents data on well nitrate levels from 2024. A total of 384 samples were taken, and excessive nitrate content was found in 308 of them (nearly 80% of the wells tested). This figure does not correlate with official data. Similar data were recorded in 2025 (74% above-norm levels and significant exceedances).

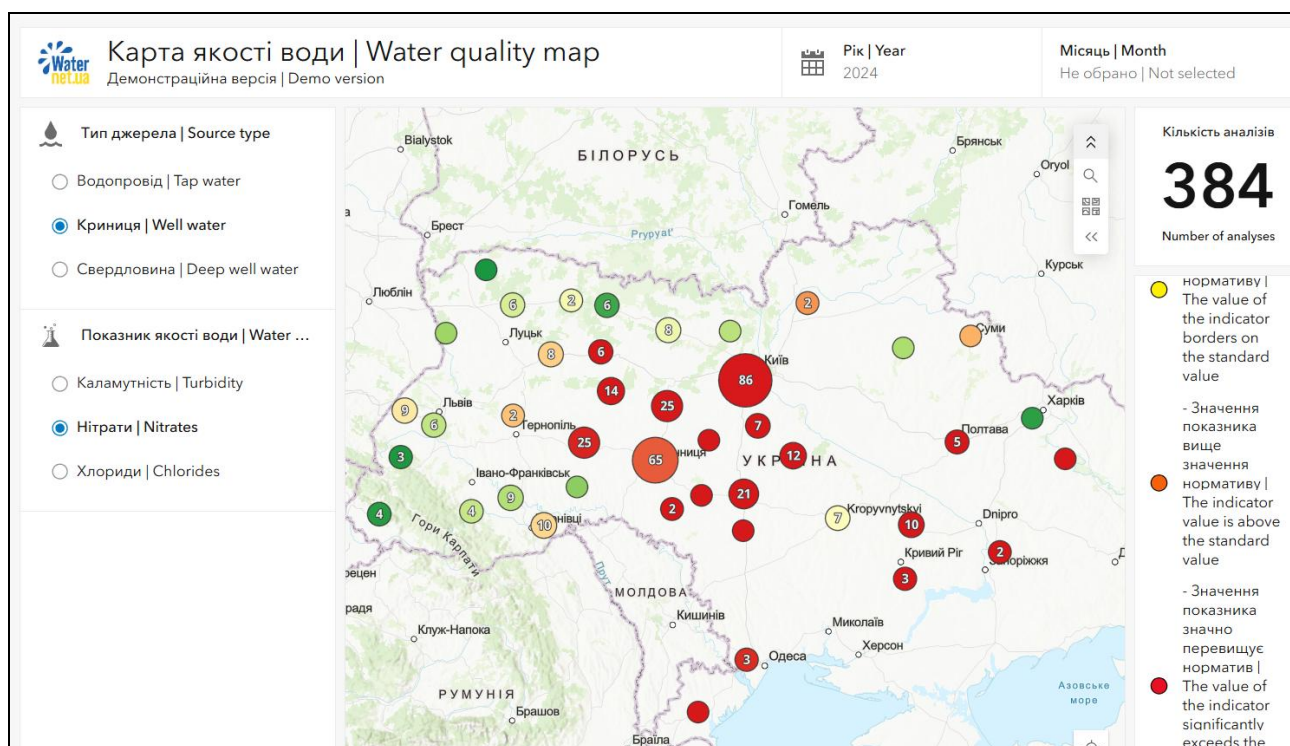


Figure. Interactive mapping system developed by WaterNet showing nitrate pollution of wells across Ukraine's 23 regions Access site: <https://waternet.ua/karta-yakosti#flex-1>

This situation necessitates a shift from paper-based to digital, evidence-based policymaking, in which information technology and citizen science play a key role.

Despite the formal adoption of regulations (Order of the Ministry of Environment No. 587, Order of the Ministry of Agrarian Policy No. 382), a phenomenon of “institutional simulacrum” has emerged in Ukraine: the real state of groundwater is replaced by statistical simulations. The application of the Mann-Kendall test, Romanovsky method, and Charlier method in the absence of the required sample size (at least 20 measurements at one point) and relevant time series turns monitoring into a mathematical fiction. Poland’s experience (Case C-356/13, ECJ) shows that attempts to minimize the area of Nitrate Vulnerable Zones (NVZs) through data manipulation can lead to lawsuits and multi-million euro fines. The state monitoring network consists of only a few posts on major rivers, ignoring the first groundwater horizon from which people draw water.

A critical yet often overlooked dimension of the institutional simulacrum is the systemic closure of primary environmental data to citizens. Even when official monitoring does exist - however sparse – its results are rarely made available to the public in a usable, georeferenced format.

*Legal barriers.* State monitoring data are classified as “official statistics” or “interdepartmental information”, requiring formal freedom of information (FOI) requests. Responses often take months, are heavily aggregated, or are denied citing “national security” or “commercial sensitivity” (especially near agrohholdings).

*Technical barriers.* When data are released, they often come as scanned PDF tables without coordinates, seasonal timestamps, or well identifiers. There is no open API, no machine-readable formats (CSV/GeoJSON), and no integration with public web-GIS portals.

*Institutional fragmentation.* Different agencies (Ministry of Economy, Environment and Agriculture of Ukraine, Ministry of Health laboratory centres, State Agency for Water Resources) collect similar data but do not share it. Citizens cannot easily know which agency to contact.

Under Directive 91/676/EEC, Member States (and candidate countries) are required to make monitoring results available to the public in a transparent and accessible manner. Closed data directly violates this principle and:

- Prevents early warning – residents of polluted villages often discover contamination only after health impacts occur (e.g., methemoglobinemia in infants).
- Blocks independent verification – without open access to official well data, citizen science measurements cannot be compared with state measurements to expose discrepancies.
- Undermines trust – when authorities publish "safe averages" but refuse to share raw data, citizens may rightly perceive an intentional cover-up.
- Citizen science offers a mechanism to overcome this information vacuum. By engaging community residents, students, and environmental activists in systematic data collection with GPS tagging, it is possible to create a big data array independent of bureaucratic constraints.

Key tools include portable Horiba LAQUAtwin ion meter ( $\text{NO}_3^-$  measurement accuracy up to 1 mg/L, range 0-2000 mg/L, selective electrode, minimum sample volume 0.3 mL); mobile application for recording coordinates (GPS), photographing pollution sources (slurry pits, manure storage, fields), and automatically generating a protocol; cloud platform for real-time data aggregation. These tools offer high spatial resolution, speed, low cost per analysis, and protection against post-hoc data manipulation (Table 2).

Table 2. Comparative Analysis: Official vs. Citizen Science Monitoring

| Criterion           | Official Monitoring                   | Citizen Science Monitoring (Horiba + GIS) |
|---------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|
| Measuring frequency | 1-4 times per year (few transects)    | Weekly/monthly at any available point     |
| Spatial coverage    | Dozens of posts for the whole country | Thousands of points (wells, springs)      |

|                                 |                                                     |                                         |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Cost per analysis               | High (stationary laboratory)                        | Low (one-time purchase of devices)      |
| Transparency                    | Closed databases, averaging, no coordinates         | Open maps, gps tagging, raw data        |
| Access to raw data for citizens | Closed / restricted (PDF summaries, no coordinates) | Fully open (real-time, maps, downloads) |
| NVZ linkage                     | Formal, based on extrapolation                      | Direct, with source identification      |

*Strategic Directions for Implementation.* To bridge the gap between policy and reality, the following steps are necessary:

- Create an open API for transferring verified citizen science data to state environmental portals.
- Mandate open-by-default publication of all nitrate monitoring results (raw data, not just aggregated reports) on a single public portal.
- Require geotagging (coordinates, well depth, aquifer horizon) and ISO timestamps for each state measurement.
- Digitize fertilizer records (electronic nitrogen logs, GPS-controlled spreading, RENDURE standards).
- Recognize independent monitoring data as a supplementary tool for NVZ delimitation (Jean Monnet projects can serve as a platform for developing such recommendations).
- Establish a complaint mechanism for citizens to appeal data denial to the Parliamentary Commissioner for Human Rights.
- Develop an interactive Web-GIS (e.g., based on Leaflet/PostGIS) where every resident can view the status of their well, compare it with neighbors, and obtain an environmental risk profile.

The digital transformation of groundwater monitoring in Ukraine is impossible without citizen science tools. Independent IT solutions (portable sensors, mobile applications, cloud GIS), make it possible to overcome the “institutional simulacrum” and ensure real, not paper-based, implementation of the Nitrates Directive.

Until state data become truly open, independent monitoring (Horiba + GPS + cloud GIS) serves as a shadow information system, generating legally admissible primary records that no FOI refusal can erase. These data create publicly verifiable facts for local councils, courts, and future European Commission audit missions.

We recommend that state policymakers amend relevant regulations to make the consideration of citizen science data mandatory when formulating monitoring programmes and NVZ zoning, and to establish open-by-default publication of all groundwater monitoring results.

*This study was financially supported by the European Union within the framework of the project 101238988 – EU\_NITRA\_UKR “Nitrate Pollution Prevention for Health Environment: European Experience of the Nitrates Directive Implementation for a Ukrainian Circular Economy” (Erasmus+ Jean Monnet Module). Views and opinions expressed are however those of the authors only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Agency for Education and Culture (EACEA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.*

1. Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. (1991). *Official Journal of the European Communities*, L 375, 1-8.

2. Ministry of Community and Territory Development of Ukraine. (2025). *Natsionalna dopovid pro iakist pytnoi vody ta stan pytnoho vodosnabzhennia ta vodovidvedennia v Ukraini u 2024 rotsi* [National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply and wastewater disposal in Ukraine in 2024]. <https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/nacionalna-dopovid-pro-iajist-pitnoyi-vodi-ta-stan-za-2024-rik.pdf>

3. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (2024). *Bericht der Bundesrepublik Deutschland gemäß Richtlinie 91/676/EWG zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen: Nitratbericht 2024*. [https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/2875/dokumente/nitratbericht\\_2024\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/2875/dokumente/nitratbericht_2024_bf.pdf)

Войтусік Степан, Цебак Олег  
*Національний університет «Львівська політехніка»*

## РОЛЬ НИЗЬКОРЕСУРСНОЇ КРИПТОГРАФІЇ В ЗАХИСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ

Моніторинг довкілля в своїх автоматизованих системах широко використовує засоби інтернету речей (IoT). При цьому необхідний захист інформації відбувається в умовах обмежених ресурсів, таких як енергія, пам'ять, обчислювана потужність і пропускна здатність. Що призводить до використання низькоресурсної криптографії. Яку ні в якому разі її не можна вважати спрощеною або принципово слабшою за звичайну [1]. Стандартні алгоритми часто можна “втиснути” у так зване “constrained”-середовище, але їхня продуктивність, енергоспоживання або затримка виявляються неприйнятними для виконуваних задач. Отже з огляду на це, та все зростаюче значення низькоресурсної криптографії а також і нагальну потребу у стандартизації алгоритмів захисту, що використовуються в умовах недостатніх ресурсів, в Європі та США були проведені конкурси на розробку криптографічних алгоритмів, призначених для використання в умовах обмежених ресурсів. По результатам цих конкурсів були прийняті стандарти «низькоресурсної криптографії» (lightweight cryptography) [2]. Розглянемо їх в контексті використання у моніторингу довкілля і на території України.

Безпека систем моніторингу навколишнього середовища зазвичай зводиться до наступних складових: організаційна, фізична, кібернетична, комунікаційна, метрологічна, функціональна, інформаційна та нормативна безпека.

До організаційної безпеки відносять: політики, регламенти, розподіл відповідальності, контроль доступу персоналу, порядок обслуговування, аудит і керування ризиками. Фізична безпека пов'язана із захистом постів спостереження, датчиків, серверів, джерел живлення, кабельних ліній і вузлів зв'язку від крадіжки, пошкодження, саботажу, пожежі, вологи, пилу та несанкціонованого доступу. В інформаційній та кібербезпеці йдеться про захист даних і систем за класичною тріадою: конфіденційність, цілісність, доступність. Для екологічних систем це означає захист телеметрії, баз даних, серверів збору показників, веб-панелей, хмарних сервісів і архівів спостережень. **Безпека** каналів передавання даних передбачає захист дротових і бездротових каналів між датчиками, шлюзами, центральними серверами та диспетчерськими пунктами: автентифікація вузлів, шифрування, сегментація мережі, захист від підміни пакунків і відмови в обслуговуванні. Для систем моніторингу довкілля недостатньо все зводити лише до кіберзахисту, тому важливим є також і метрологічна безпека і достовірність даних. Система також має зберігати працездатність при збоях датчиків, втраті зв'язку, відключенні живлення, помилках програмного забезпечення чи окремих вузлів. Сюди належать резервування, дублювання критичних компонентів, архівація, резервне копіювання і план відновлення. Також треба відмітити важливість безперервного моніторингу безпеки та реагування на інциденти. Потрібно постійно відстежувати події безпеки, зміни конфігурацій, вразливості, аномалії трафіку, ознаки вторгнення та збої програмного забезпечення. Для екологічного моніторингу також критичним є якість управління даними та простежуваність. Дуже важливим є знання джерел надходження даних, шлях їх отримання, обробки, перевірки і можливої зміни. Ну і нарешті нормативно-правова складова системи захисту, згідно якої система має відповідати

вимогам стандартів, методик спостережень, правилам ведення документації, процедурам калібрування, зберігання та звітування. Для екологічного моніторингу відповідність процедурам якості є такою ж важливою, як і технічний захист.

Криптографічні примітиви. Для систем з обмеженими ресурсами найбільш продуктивною абстракцією є AEAD, оскільки вона об'єднує конфіденційність і цілісність у межах одного примітиву та дозволяє окремо автентифікувати пов'язані дані. NIST SP 800-38D [6] визначає GCM саме як AEAD-механізм поверх AES, а в NIST SP 800-232 робиться аналогічна ставка на Ascon-AEAD128 для ресурсо обмеженого оточення. У прикладних каналах передавання це зменшує кількість окремих криптографічних компонентів і спрощує модель загрози порівняно зі схемами “CTR плюс окремий MAC”.

Ascon у [NIST SP 800-232] охоплює не лише AEAD, а й Ascon-Hash256, Ascon-XOF128 та Ascon-CXOF128. Це принципово важливо для embedded-проектування: одна стандартизована сім'я покриває шифрування телеметрії, гешування, формування довільної довжини виводу та параметрично обумовлені сценарії. Стандарт прямо визначає XOF як функцію зі змінною довжиною виходу, а потоковий API для XOF/CXOF дозволяє інкрементальну обробку без знання кінцевої довжини на старті; це корисно для потокового збору блоків, похідних задач і прив'язки контексту через рядок налаштування.

У симетричній “класичній” гілці AES залишається сильним практичним орієнтиром. FIPS 197 визначає AES як базовий блоковий шифр; [5] NIST SP 800-38A показує, що CTR – це лише режим конфіденційності, де лічильники мають бути унікальними, тоді як NIST SP 800-38D додає до шифрування в режимі лічильника ще й цілісність для зашифрованого тексту та AAD. NIST прямо зауважував, що якщо продуктивність AES прийнятна на конкретній платформі, слід використовувати AES; однак той самий [NIST IR 8114] показував, що на надто обмежених вузлах AES може не вписуватися в доступні ROM/RAM або давати неприйнятні штрафи за продуктивність. Звідси базове правило: AES-CTR сам по собі не є повним захистом каналу, тоді як AES-GCM або AES-CCM – повнішими і практично доцільнішими варіантами там, де AES підтримується ефективно.

Історично ландшафт низькоресурсної криптографії великою мірою формувався через RFID і наддешеві вбудовані пристрої. PRESENT був запропонований як ультра низько ресурсний блоковий шифр саме для RFID міток і сенсорних мереж; пізніше GIFT позиціонувався як покращення над PRESENT у безпеці та ефективності, а GIFT-COFB став одним із фіналістів конкурсу низькоресурсної криптографії NIST. У потоково орієнтованому напрямі Grain-128AEAD репрезентує AEAD-дизайн на основі зрілої Grain-родини з 128-бітним ключем і 96-бітним попсе. Однак з точки зору сучасної стандартизації для нових загальних систем моніторингу докільця ці сім'ї радше виконують роль дослідницьких або спеціалізованих альтернатив; нормативним базисом сьогодні є Ascon плюс перевірені AES-based режими там, де це можливо.

Протоколи constrained-мереж. OSCORE [RFC8613] забезпечує безпеку об'єкта для CoAP і наскрізно захищає те, що не потрібно для проксі операцій: метод, ресурс, payload та пов'язані поля можуть бути зашифровані або принаймні з захищеною цілісністю, тоді як частина зовнішніх полів лишається доступною для маршрутизації. Стандарт прямо визначає наскрізне шифрування, цілісність, захист від повторного відтворення, зв'язування відповідь-запит. При цьому він також попереджає, що деякі поля повідомлення наскрізно не захищені і ризикують бути підробленими, тож OSCORE не слід романтизувати як “тотальний” захист кожного біта пакета.

EDHOC [RFC9528], своєю чергою, вирішує задачу мінімалістичного розподілу ключів: він надає взаємну автентифікацію, пряму секретність, захист ідентифікатора і зберігає невеликий код завдяки повторному використанню CBOR/COSE/CoAP. Особливо показовою є норма з RFC: у варіанті з сирих публічних ключів і перенесенням у CoAP розмір EDHOC обміну може бути меншим за одну сьому DTLS 1.3 handshake. Для обмежених радіканалів це не косметична різниця, а прямий виграш у затримці, енергії і часу в ефірі. [RFC9668] додатково

дозволяє об'єднати EDHOC з першою OSCORE-транзакцією, скорочуючи початкову фазу до мінімуму проходів.

TLS/DTLS-профілі для IoT залишаються релевантними там, де потрібна традиційна модель безпечного каналу. повне шифрування всієї транспортної сесії або сумісність з наявним PKI сертифікатним стеком. RFC7925 формалізував профілі TLS/DTLS 1.2 для IoT, а draft TLS/DTLS 1.3 IoT профіль у редакції 2026 року пропонує профілі для TLS/DTLS 1.3 і розглядає основу на сертифікатах, сирих відкритих ключах та зовнішньому PSK автентифікацію. Тобто реальний вибір не є бінарним “OSCORE/EDHOC проти TLS”; у шлюзових або багато стрибкових архітектурах стандарти прямо допускають комбінування наскрізного OSCORE зі стрибковим (D)TLS на окремих ділянках.

Порівняльний аналіз. Наведене нижче порівняння подано без конкретних апаратних обмежень. Тому оцінки є відносними та якісними: вони відображають загальні тенденції зі стандартів і опублікованих експериментів, а не універсальні константи. На практиці на вибір сильно впливають наявність AES-акселератора, клас microcontroller, тип радіоканалу, довжина пакетів і політика керування ключами.

| Об'єкт                               | Роль                     | ROM/RAM                | Енергія і затримка | Пропускна здатність                                          | Властивості безпеки                                                                                          | Висновок для моніторингу                                                 |
|--------------------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Ascon-AEAD128                        | AEAD                     | низькі                 | низькі–середні     | добра для коротких telemetry packets                         | конфіденційність, цілісність, автентичність; без FS                                                          | найкращий загальний software-first baseline                              |
| Ascon-Hash256 / XOF128 / CXOF128     | hash / XOF               | низькі                 | низькі             | залежить від довжини виводу                                  | цілісність/відбиток/deduplication; без конфіденційності                                                      | корисно для secure update, fingerprints, KDF                             |
| AES-CTR                              | Конфіденційність         | низькі–середні         | низькі             | висока, особливо з AES support                               | лише конфіденційність; без цілісності, без FS                                                                | прийнятний тільки разом із MAC/AEAD                                      |
| AES-GCM                              | AEAD                     | середні                | середні            | висока з AES acceleration                                    | конфіденційність, цілісність, автентичність; без FS                                                          | сильний вибір за наявності апаратної підтримки AES                       |
| PRESENT / GIFT-подібні block ciphers | lightweight block cipher | дуже низькі в hardware | низькі             | залежить від mode wrapping                                   | самі по собі не дають повного secure channel                                                                 | придатні у вузьких hardware-сценаріях, але не як дефолт для нових систем |
| Grain-128AEAD                        | stream-based AEAD        | низькі                 | низькі             | добра у stream/serial реалізаціях                            | конфіденційність, цілісність, автентичність; без FS                                                          | альтернатива, але не поточний NIST baseline                              |
| OSCORE                               | захист CoAP-повідомлень  | низькі                 | низькі per-message | менший message overhead, ніж у DTLS, у published evaluations | end-to-end конфіденційність, цілісність, replay protection, binding response-to-request; FS залежить від AKE | оптимально для CoAP через проксі/шлюзи                                   |

|                          |                             |                |                                              |                                        |                                                           |                                                          |
|--------------------------|-----------------------------|----------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| EDHOC                    | AKE / bootstrap             | низькі–середні | нижчі за DTLS у constrained settings         | дуже компактний handshake              | взаємна автентифікація, FS, identity protection           | рекомендований bootstrap для OSCORE                      |
| TLS/DTLS профілі для IoT | транспортний secure channel | середні–вищі   | вищі на handshake; per-session state більший | добра сумісність з existing PKI stacks | конфіденційність, цілісність, автентичність; FS з (EC)DHE | доцільно, якщо потрібен класичний channel security model |

Рекомендації для проєктувальників систем моніторингу докільля. Для нових CoAP-centric систем базовим патерном доцільно вважати EDHOC для bootstrap + OSCORE для регулярної телеметрії. Цей варіант мінімізує байти по повітрю, природно працює через проксі-сервери, дає властивості наскрізного шифрування і масштабовано вкладається в обмежене розгортання. Якщо ж потрібна сумісність із традиційною сервером PKI, повноканальною семантикою або готовий TLS ланцюжок інструментів, варто переходити до TLS/DTLS-профілів, але без ілюзії, що їхня вартість рукописання безкоштовна в LPWAN і радіостанції з робочим циклом. У змішаних топологіях виправдане поєднання наскрізного OSCORE зі стрибковим (D)TLS на окремих ділянках.

На рівні симетричних примітивів практичне правило таке: якщо платформа має ефективну AES підтримку і ефективний бюджет це дозволяє, використання AES-GCM або AES-CCM є цілком раціональним; якщо ж потрібен програмно-орієнтований легкий базовий варіант без опори на AES прискорення, пріоритет слід віддати Ascon-AEAD128, а для гешування, завдань, пов'язаних з оновленнями, – Ascon-Hash256 / XOF / CXOF. AES-CTR як самостійний засіб безпека каналу слід уникати, бо він не розв'язує задачу цілісності.

Нарешті, архітектура безпеки систем моніторингу докільля має бути синхронізована з QA-архітектурою. Ключі, безпечне сховище, оновлення прошивки, журналювання, синхронізація часу, записи калібрування, QAPP, шаблони перевірки та процедури колокації слід проєктувати як єдину довірчу систему. Для недорогих датчиків без цього будь-яка криптографія лише забезпечить надійне доставлення потенційно недостовірного вимірювання. Саме тому найкращою практикою є не просто “низькоресурсне шифрування за замовчуванням”, а низькоресурсне шифрування + управління якістю даних проєкту.

1. M. Sönmez Turan, K. A. McKay, D. Chang, J. Kang, and J. Kelsey, *Ascon-Based Lightweight Cryptography: Standards for Constrained Devices: Authenticated Encryption, Hash, and Extendable Output Functions*, NIST SP 800-232, 2025. doi:10.6028/NIST.SP.800-232.

2. K. A. McKay et al., *Report on Lightweight Cryptography*, NIST IR 8114, 2017. doi:10.6028/NIST.IR.8114.

3. *Status Report on the Final Round of the NIST Lightweight Cryptography Standardization Process: NIST Releases IR 8454*, 2023.

4. *Advanced Encryption Standard (AES)*, Federal Information Processing Standard 197, updated ed., 2023.

5. M. Dworkin, *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Methods and Techniques*, NIST SP 800-38A, 2001.

6. M. Dworkin, *Recommendation for Block Cipher Modes of Operation: Galois/Counter Mode (GCM) and GMAC*, NIST SP 800-38D, 2007.

7. C. Bormann, M. Ersue, and A. Keränen, *Terminology for Constrained-Node Networks*, RFC 7228, 2014. doi:10.17487/RFC7228.

8. Z. Shelby, K. Hartke, and C. Bormann, *The Constrained Application Protocol (CoAP)*, RFC 7252, 2014. doi:10.17487/RFC7252.

9. H. Tschofenig and T. Fossati, *Transport Layer Security (TLS) / Datagram Transport Layer Security (DTLS) Profiles for the Internet of Things*, RFC 7925, 2016. doi:10.17487/RFC7925.

10. G. Selander, J. Mattsson, F. Palombini, and L. Seitz, *Object Security for Constrained RESTful Environments (OSCORE)*, RFC 8613, 2019. doi:10.17487/RFC8613.
11. G. Selander, J. Preuß Mattsson, and F. Palombini, *Ephemeral Diffie-Hellman Over COSE (EDHOC)*, RFC 9528, 2024. doi:10.17487/RFC9528.
12. F. Palombini et al., *Using Ephemeral Diffie-Hellman Over COSE (EDHOC) with the Constrained Application Protocol (CoAP) and Object Security for Constrained RESTful Environments (OSCORE)*, RFC 9668, 2024. doi:10.17487/RFC9668.

**Dzhumelia Elvira**  
**Lviv Polytechnic National University**

## **INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT IN AREAS AFFECTED BY POST-INDUSTRIAL SITES**

**Introduction.** Areas affected by mining and industrial enterprises, particularly tailings storage facilities and waste dumps, are characterized by a high level of man-made load and the formation of complex geosystems with significant risks of environmental degradation [1-4]. These challenges become especially relevant under conditions of post-industrial transformation and military impact, which are accompanied by disruptions of the hydrological regime, infrastructure damage, and intensification of pollutant migration processes.

In Ukraine, traditional approaches to environmental control based on periodic sampling do not provide sufficient timeliness or spatial representativeness for detecting dynamic environmental changes. Therefore, modern information technologies are increasingly applied worldwide, including IoT-based monitoring solutions, information and analytical platforms, and decision-support systems that utilize artificial intelligence methods [5-9]. An additional risk factor is climate change, which necessitates the use of advanced hydrological and hydraulic models for flood prediction, dam stability assessment, and evaluation of potential pollutant spread [10]. At the same time, the migration of heavy metals in soils poses long-term environmental and health risks [11].

However, most existing solutions do not account for the specific conditions of post-industrial sites, particularly the presence of aggressive environments, which limits their applicability.

**The aim of the study** is to improve approaches to environmental risk assessment in areas affected by post-industrial sites using information technologies.

**Results and Discussion.** Environmental risk assessment in areas affected by post-industrial sites is a complex, multifactorial process that requires consideration of both natural and man-made factors. The main factors include spatial and temporal variability in pollution levels, hydrological characteristics of the territory, the technical condition of engineering structures, and external influences such as climate change and military impacts.

The proposed approach to environmental risk assessment relies on information technologies that enable the integration and comprehensive analysis of heterogeneous data. Structurally, the approach includes three interrelated stages: data collection and preparation, spatial analysis, and risk assessment.

At the first stage, an information base is formed, including field monitoring data, remote sensing data, state monitoring datasets, and open geospatial data. Considering the specific conditions of post-industrial sites, the use of non-contact or resistant-to-aggressive-environment sensors is

promising, as it enables data acquisition in highly mineralized water and under elevated pollutant concentrations.

The second stage involves applying geographic information systems (GIS) for data processing and analysis. Spatial analysis includes integrating multiple data layers, performing buffer analysis, and interpolating pollution indicators. This enables the identification of pollutant distribution patterns, detection of potential migration pathways, and localization of areas with increased environmental risk.

At the third stage, environmental risks are assessed using an indicator system. These include water, soil, and air quality indicators; hydrological characteristics; and indicators reflecting the technical condition of facilities (particularly dams and waste storage units). The integration of these indicators enables a generalized risk assessment and the ranking of territories by environmental threat level.

An important advantage of the proposed approach is its ability to account for spatial and temporal variations in environmental conditions, thereby enabling more informed decision-making. The use of information technologies also enables automated data processing and increases responsiveness to potential environmental threats.

**Conclusions.** The application of information technologies improves the efficiency of environmental risk assessment in areas affected by post-industrial sites. The proposed approach considers the spatial characteristics of pollution and can support decision-making in environmental safety management and post-industrial land restoration.

1. Іванов Є. (2026). Постмайнінгові геосистеми Стебницького хвостосховища: геоекологічний стан, умови формування і функціонування. *Звітна наукова конференція Львівського національного університету імені Івана Франка*. Львів, Україна.

2. Mokryi, V., Petrushka, I., Dyakiv, V., Dzhumelia, E., & Salamon, I. (2023). Information supply of hydrotechnical reconstruction concept of Stebnyk tailings storage (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(2), 120–130. <https://doi.org/10.12912/27197050/156977>

3. Dzhumelia, E., & Pohrebennyk, V. (2021). Methods of soils pollution spread analysis: Case study of mining and chemical enterprise in Lviv region (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 22(4), 39–44. <https://doi.org/10.12912/27197050/137872>

4. Погребенник, В. Д., Мітрясова, О. П., Дяків, В. О., Джумеля, Е. А., & Крайківський, Р. С. (2021). Реалізація комплексного оперативного моніторингу небезпечних промислових відходів. *Еко Форум – 2021: Збірка тез доповідей V спеціалізованого міжнародного запорізького екологічного форуму* (с. 292–294). Запоріжжя, Україна.

5. Khoshsepehr, Z., Alinejad, S., & Alimohammadlou, M. (2023). Exploring industrial waste management challenges and smart solutions: An integrated hesitant fuzzy multi-criteria decision-making approach. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138327. [10.1016/j.jclepro.2023.138327](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138327)

6. Джумеля, Е. А., Джумеля, В. А., & Кочан, О. В. (2023). Роль екологічного моніторингу у проблемі визначення стану екологічної безпеки в зоні накопичення промислових відходів. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: збірник матеріалів VIII Міжнародного молодіжного конгресу* (с. 53). Львів, Україна.

7. Miller, M., Kisiel, A., Cembrowska-Lech, D., et al. (2023). IoT in Water Quality Monitoring—Are We Really Here? *Sensors*, 23(2), 960. [10.3390/s23020960](https://doi.org/10.3390/s23020960)

8. Naloufi, M., Abreu, T., Souihi, S., et al. (2024). Long-Term Stability of Low-Cost IoT System for Monitoring Water Quality in Urban Rivers. *Water*, 16(12), 1708. [10.3390/w16121708](https://doi.org/10.3390/w16121708)

9. Bernatska, N., Dzhumelia, E., Typilo, I., Kochan, O., & Salamon, I. (2024). Neural networks for environmental monitoring: A web application for image recognition. In *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 48 (pp. 3–15). [10.3233/ATDE231310](https://doi.org/10.3233/ATDE231310)

10. Brand, J. H., & Spencer, K. L. (2023). Potential pollution risks of historic landfills in England: Further analysis of climate change impacts. *WIREs Water*. [10.1002/wat2.1706](https://doi.org/10.1002/wat2.1706)

11. Sheremeti-Kabashi, F. H. & Hajra, A. E. (2026). Assessment of soil contamination by cadmium, chromium, vanadium, and antimony near a mining tailings dump in Graçanica, Kosovo. *Journal of Ecological Engineering*, 27(3), 259–273. [10.12911/22998993/213636](https://doi.org/10.12911/22998993/213636)

**Дрогомирецький Роман, Кавчук Ірина, Дубляк Андрій, Різничук Надія**  
*Карпатський національний університет імені Василя Стефаника*

**БІОІНДИКАЦІЯ СТАНУ УРБОЕКОСИСТЕМИ МІСТА ІВАНО-ФРАНКІВСЬК ЗА  
ФЛУКТУЮЧОЮ АСИМЕТРІЄЮ ЛИСТКІВ *BETULA PENDULA* ROTH.  
(М. ІВАНО-ФРАНКІВСЬК)**

У роботі досліджено можливість використання флуктуючої асиметрії листків *Betula pendula* Roth. як індикатора екологічного стану урбанізованого середовища Івано-Франківськ. Проаналізовано варіацію показника у різних функціональних зонах міста. Встановлено, що рівень асиметрії зростає зі збільшенням антропогенного навантаження. Отримані результати підтверджують ефективність методу біоіндикації для оцінки якості міського середовища.

Інтенсивна урбанізація є однією з ключових ознак сучасного розвитку суспільства та супроводжується значними змінами природного середовища. У межах міст відбувається накопичення забруднювачів атмосферного повітря, трансформація ґрунтів, зростання техногенного навантаження та порушення природних екосистем (Grimm et al., 2008).

Оцінка екологічного стану урбанізованих територій потребує застосування чутливих і доступних методів. Одним із таких підходів є біоіндикація – використання живих організмів для визначення якості довкілля (Markert et al., 2003). Біоіндикаційні методи дозволяють інтегрально оцінювати вплив комплексу факторів, що є їхньою суттєвою перевагою порівняно з фізико-хімічними аналізами.

Флуктуюча асиметрія (ФА) є показником стабільності розвитку організмів і відображає їхню здатність протистояти стресовим факторам середовища. Вона проявляється у випадкових відхиленнях від ідеальної двобічної симетрії морфологічних структур (Palmer & Strobeck, 2003). Зростання ФА пов'язане з дією несприятливих умов, таких як забруднення повітря, токсичні речовини або інші антропогенні фактори (Beasley et al., 2013).

Береза повисла (*Betula pendula* Roth) є поширеним видом у міському озелененні Європи та характеризується високою чутливістю до змін довкілля, що робить її ефективним біоіндикатором (Kozlov et al., 2017).

Метою даної роботи є оцінка екологічного стану міста Івано-Франківськ за допомогою аналізу флуктуючої асиметрії листків берези повислої.

Дослідження проводилися на території міста Івано-Франківськ у межах трьох типів функціональних зон: центральної частини міста з інтенсивним транспортним навантаженням, житлових районів та паркових територій із відносно низьким рівнем антропогенного впливу.

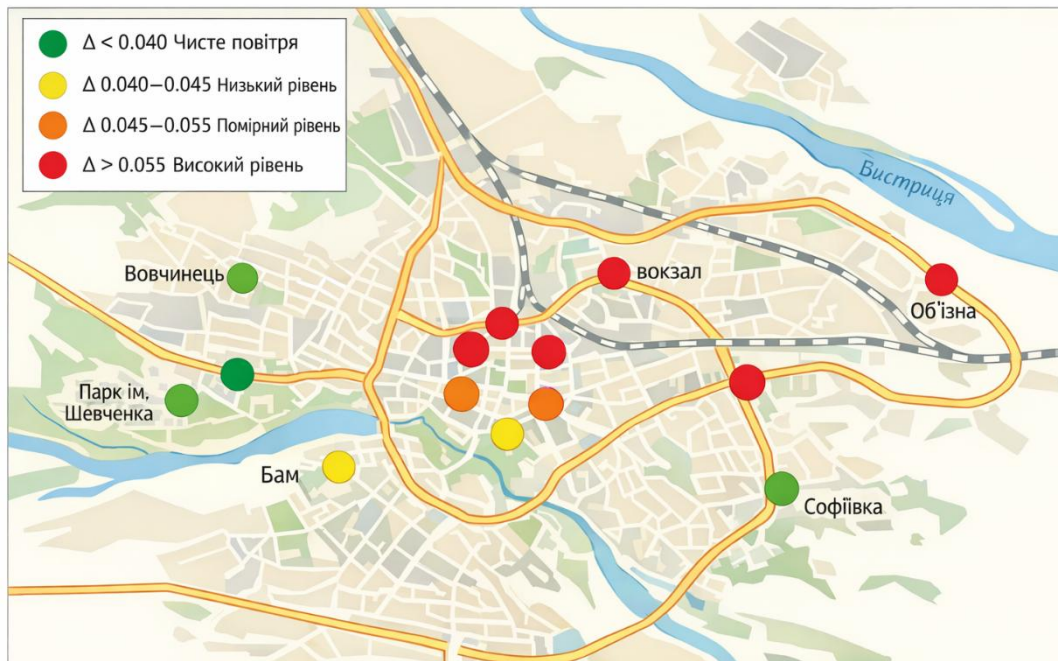


Рис. 1. Карта розташування дослідних ділянок у межах міста Івано-Франківськ (центр, житлові райони, паркові зони).

Об'єктом дослідження були листки *Betula pendula*, відібрані з дерев приблизно однакового віку та життєвого стану. Відбір матеріалу здійснювали у літній період. З кожної ділянки відбирали не менше 30 листків без видимих ушкоджень із висоти 1,5–2 м, що відповідає рекомендаціям щодо стандартизації відбору (Kozlov et al., 2017).

Для оцінки флуктуючої асиметрії проводили морфометричні вимірювання симетричних параметрів листової пластинки. Вимірювали довжину або ширину правої (R) та лівої (L) половини листка відносно центральної жилки.

Індекс флуктуючої асиметрії розраховували за формулою:

$$FA = |L - R| / ((L + R) / 2)$$

Застосування нормованого індексу дозволяє уникнути впливу розмірів листка на результати аналізу (Palmer & Strobeck, 2003).

Статистичну обробку даних проводили з використанням методів описової статистики. Для кожної ділянки визначали середнє значення показника та стандартне відхилення. Для оцінки відмінностей між групами може застосовуватися t-критерій Стюдента або дисперсійний аналіз (ANOVA) (Zar, 2010).

У ході дослідження встановлено варіацію значень флуктуючої асиметрії залежно від функціональної зони міста. Найвищі значення показника зафіксовано у центральній частині міста, що характеризується інтенсивним транспортним рухом та підвищеним рівнем забруднення.

Отримані результати свідчать про зростання морфологічної нестабільності рослин із підвищенням рівня антропогенного навантаження. Подібні закономірності відзначалися і в інших дослідженнях урбанізованих територій (Beasley et al., 2013). Результати аналізу флуктуючої асиметрії листків берези повислої в різних районах міста Івано-Франківськ наведено на рис. 2.

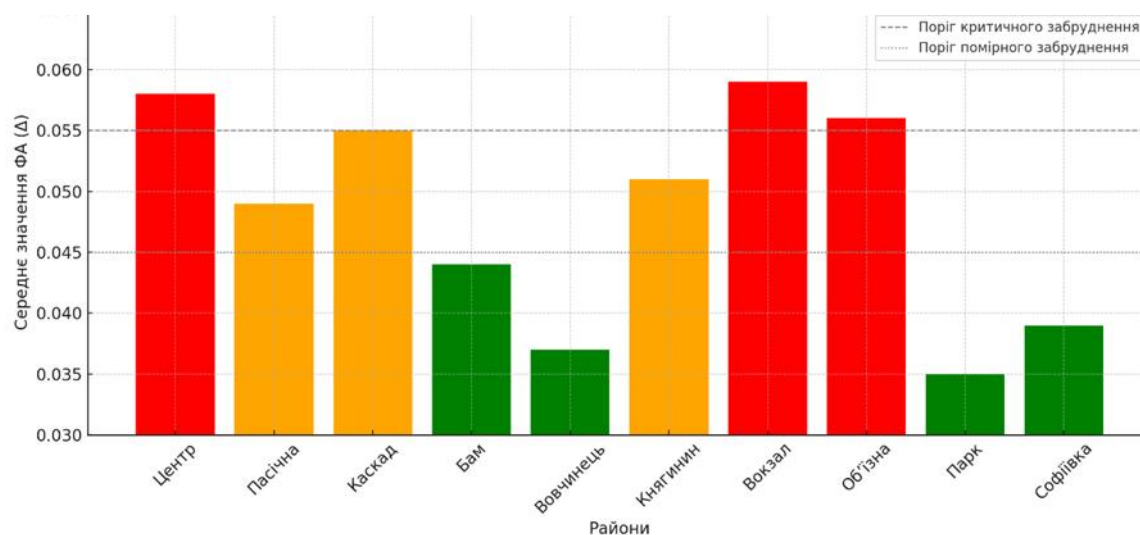


Рис. 2. Флуктуюча асиметрія листків *Betula pendula* Roth. в різних районах м. Івано-Франківськ.

Встановлено, що найвищі значення показника характерні для центральної частини міста та районів із інтенсивним транспортним навантаженням, зокрема району залізничного вокзалу, де середні значення досягають 0,057–0,059. Це свідчить про значний рівень антропогенного впливу та екологічного стресу.

У житлових районах (Пасічна, Каскад, БАМ) значення флуктуючої асиметрії мають середній рівень (0,048–0,055), що відповідає помірному рівню забруднення середовища.

Найнижчі значення показника зафіксовано у паркових та умовно природних зонах (міський парк, Вовчинець, Вовчинецькі гори), де значення флуктуючої асиметрії становлять 0,035–0,045, що свідчить про більш сприятливі умови для розвитку рослин.

Порогові значення інтерпретації рівня флуктуючої асиметрії використано відповідно до літературних даних (Beasley et al., 2013), згідно з якими підвищення показника асоціюється з посиленням екологічного стресу.

Таким чином, отримані результати демонструють чітку залежність між рівнем урбанізації території та морфологічною стабільністю рослин.

Результати дослідження підтверджують, що флуктуюча асиметрія є чутливим індикатором стресових умов середовища. Підвищені значення показника у центральній частині міста можуть бути зумовлені впливом транспортних викидів, зокрема оксидів азоту, діоксиду сірки та твердих частинок (WHO, 2021).

Крім того, значну роль відіграють такі фактори, як ущільнення ґрунтів, дефіцит вологи та підвищена температура міського середовища (ефект «теплового острова») (Grimm et al., 2008).

Низькі значення флуктуючої асиметрії у паркових зонах свідчать про більш сприятливі умови для росту рослин. Зелені насадження виконують важливу екологічну функцію, знижуючи рівень забруднення та стабілізуючи мікроклімат.

Отримані результати узгоджуються з даними інших досліджень, які підтверджують ефективність використання рослин як біоіндикаторів стану довкілля (Markert et al., 2003; Kozlov et al., 2017).

Водночас слід зазначити, що метод флуктуючої асиметрії має певні обмеження, пов'язані з впливом природних факторів, тому доцільно поєднувати його з іншими методами екологічного моніторингу.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що рівень флуктуючої асиметрії листків *Betula pendula* змінюється залежно від умов середовища в межах міста Івано-Франківськ.

Найвищі значення показника характерні для центральних районів із високим антропогенним навантаженням, тоді як найнижчі – для паркових територій.

Отже, флюктуюча асиметрія листків берези повислої може бути використана як ефективний інструмент оцінки екологічного стану урбанізованих територій і рекомендована для застосування у системах екологічного моніторингу.

1. Beasley, D. A. E., Bonisoli-Alquati, A., & Mousseau, T. A. (2013). The use of fluctuating asymmetry as a measure of environmental stress in animals: A meta-analysis. *Ecological Indicators*, 30, 218–226.
2. Grimm, N. B. et al. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756–760.
3. Kozlov, M. V., Zverev, V., & Zvereva, E. L. (2017). Impacts of environmental pollution on fluctuating asymmetry in plants: A meta-analysis. *Ecological Indicators*, 76, 182–193.
4. Markert, B., Breure, A. M., & Zechmeister, H. G. (2003). *Bioindicators and Biomonitoring*. Elsevier.
5. Palmer, A. R., & Strobeck, C. (2003). Fluctuating asymmetry analyses revisited. In: *Developmental Instability*. Oxford University Press.
6. World Health Organization (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines*.
7. Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis* (5th ed.). Pearson.
8. European Environment Agency (2022). Air quality in Europe – 2022 report.

Гивлюд Анна, Гамаш Олександр  
Національний університет «Львівська політехніка»

## **АДСОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ФОСФОРУ ПРИРОДНИМ ЦЕОЛІТОМ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ У МОЛОЧНІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ**

У 2026 році стратегічний вектор розвитку харчової промисловості України нерозривно пов'язаний із впровадженням засад «зеленої» економіки та адаптацією до екологічних стандартів Європейського Союзу. Однією з найбільш гострих проблем молочної галузі залишається високий рівень антропогенного навантаження на водні екосистеми через скиди стічних вод із надлишковим вмістом сполук фосфору. Фосфати є головним чинником прогресуючої еутрофікації водойм, що призводить до деградації біорізноманіття та погіршення якості питної води.

У контексті циркулярної економіки фосфор розглядається не лише як забруднювач, а як вичерпний ресурс, що підлягає рекуперації та повторному використанню. Традиційні методи очищення часто є енергоємними або призводять до утворення значної кількості важкоутилізованих шлаків. Саме тому актуальним є перехід до адсорбційних технологій із використанням природних мінеральних сорбентів, зокрема цеолітів. Використання природного цеоліту дозволяє реалізувати замкнений цикл виробництва: від ефективного вилучення фосфору зі стоків до подальшого застосування насиченого мінералу як пролонгованого органіко-мінерального добрива. Такий підхід повністю відповідає концепції "Zero Waste" та є інструментом екологізації вітчизняних молокопереробних підприємств на шляху до сталого майбутнього ЄС.

Об'єктом дослідження були обрані стічні води Самбірського молокозаводу, які характеризуються високим вмістом біогенних елементів, зокрема сполук фосфору. Як адсорбент для вилучення фосфатів використовували природний цеоліт (кліноптилоліт) Сокирицького родовища (фракція 1,0–2,0 мм), що характеризується високим вмістом кліноптилоліту відповідно до вимог сорбційних процесів.

Експериментальні дослідження проводили у кілька етапів за загальноприйнятими у гідрохімії та фізичній хімії методиками. Визначення концентрації фосфорних сполук здійснювали фотоколориметричним методом, що базується на утворенні інтенсивно забарвленої синьої фосфорномолібденової гетерополікислоти при взаємодії фосфатів із молібдатом амонію у кислому середовищі; оптичну густину розчинів вимірювали на фотоелектроколориметрі при довжині хвилі 670 нм.

Дослідження адсорбційної ємності цеоліту щодо фосфорних сполук реалізовували у статичних умовах шляхом контакту наважок сорбенту масою від 1 до 10 г з модельними та реальними розчинами об'ємом 100 мл. Процес тривав до встановлення сорбційної рівноваги при постійному перемішуванні. Розрахунок статичної активності сорбенту проводили за балансовим рівнянням на основі різниці початкової та рівноважної концентрацій фосфору. Паралельно із сорбційними вимірюваннями здійснювали моніторинг водневого показника середовища потенціометричним методом, оскільки зміна рН є важливим індикатором механізму взаємодії в системі «сорбент–сорбат» та визначає умови подальшого використання відпрацьованого мінералу як мінерального добрива.

Експериментальні дослідження статичної активності природного цеоліту (клинотиліоліту) продемонстрували його високу селективність щодо ортофосфат-іонів, які є домінуючою формою фосфорних сполук у стоках Самбірського молокозаводу. Встановлено, що ізотерма адсорбції фосфатів належить до L-типу за класифікацією Джайлса, що вказує на сильний міжмолекулярний зв'язок між адсорбатом і активними центрами сорбенту. При низьких початкових концентраціях фосфору (до 15–20 мг/дм<sup>3</sup>) спостерігається майже повне вилучення забруднювача (ефективність понад 85%), що є критично важливим для досягнення жорстких нормативів ЄС щодо скиду очищених вод у відкриті водойми.

Аналіз кінетичних кривих сорбції дозволив встановити, що процес складається з двох основних стадій: швидкої зовнішньодифузійної сорбції на поверхні зерен цеоліту та повільнішої внутрішньодифузійної стадії, під час якої іони фосфору проникають у внутрішню структуру мікропор мінералу. Час досягнення адсорбційної рівноваги становить близько 90–180 хвилин, проте основна частина фосфорного навантаження (до 75%) знімається в перші 60 хвилин контакту фаз. Це дозволяє оптимізувати габаритні розміри майбутніх адсорбційних споруд на підприємстві, зменшуючи їх металоємність.

Окрему наукову цікавість викликає зафіксована закономірність зміни водневого показника рН у системі. В ході експерименту було виявлено, що при початкових значеннях рН стічної води на рівні 6–7.2, після контакту з цеолітом спостерігається підлужування середовища до рН 7.3–7.5. Це явище обумовлене гідролізом алюмосилікатного каркаса цеоліту та обмінними процесами між катіонами сорбенту та компонентами стоку. Зміна рН відіграє двояку роль. З одного боку, вона сприяє переходу частини фосфатів у менш розчинні форми, що покращує їх затримання в шарі сорбенту, з іншого – вимагає врахування при розрахунку загальної соленоїдної стійкості системи.

З позицій екологізації економіки та стратегії «Green Future», такий процес адсорбції є ідеальним прикладом рециклінгу нутрієнтів. Вилучений фосфор міцно утримується в структурі цеоліту, але залишається доступним для кореневих систем рослин завдяки механізму повільного вивільнення (*slow-release fertilizers*). Таким чином, відпрацьований на Самбірському молокозаводі цеоліт перетворюється з відходу очисних споруд на меліорант, здатний покращувати структуру ґрунтів та збагачувати їх біогенними елементами, що повністю закриває цикл «виробництво – очищення – агросектор» без утворення вторинних забруднювачів.

Проведені дослідження підтвердили високу ефективність застосування природного цеоліту Сокирницького родовища як селективного сорбенту для вилучення сполук фосфору зі стічних вод молочної промисловості. При встановленні адсорбційної рівноваги через 180 хвилин контакту фаз ступінь очищення стоків досягає 80–90%, що дозволяє забезпечити відповідність якості очищеної води жорстким екологічним стандартам Європейського Союзу.

Зафіксоване в ході експерименту зростання показника рН від 6 до 7.5 підтверджує іонообмінний механізм адсорбції та сприяє хімічній стабілізації середовища.

На основі отриманих результатів рекомендується інтегрувати відпрацьований сорбент у технологічний ланцюг агропромислового сектору як органо-мінеральне добриво пролонгованої дії. Оскільки цеоліт після процесу очищення насичується біогенними елементами, його внесення у ґрунт дозволяє реалізувати модель циркулярної економіки на прикладі Самбірського молокозаводу. Використання такого насиченого мінералу забезпечує поступове вивільнення фосфору для живлення рослин, покращує структуру ґрунтів та запобігає вторинному забрудненню підземних вод, що є важливим кроком у стратегії екологізації економіки та сталого розвитку.

1. Гивлюд, А. М. (2016). *Знешкодження забруднень стічних вод молокопереробних комплексів сорбційними методами* (Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук). Національний університет «Львівська політехніка», Львів.

2. Гивлюд, А. М., Гумницький, Я. М., & Руда, М. В. (2022). *Очищення стічних вод молочної промисловості методом адсорбції* (Монографія). Київ: ГО «МНГ». 133 с.

3. Hyvlud, A., Sabadash, V., Gumnitsky, J., & Ripak, N. (2017). Monitoring of pollution of dairy enterprises wastewater [Моніторинг забруднення стічних вод молокопереробних підприємств]. *Chemistry & Chemical Technology*, 11(2), 237–242.

4. Європейська Комісія. (2020). *Новий план дій щодо циркулярної економіки: Для чистішої та конкурентоспроможнішої Європи*. COM/2020/98 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>

5. Регламент (ЄС) 2019/1009 Європейського Парламенту та Ради від 5 червня 2019 року, що встановлює правила розміщення на ринку добрив ЄС. *Офіційний вісник Європейського Союзу*, L 170. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R1009>

**Гнєзділова Вікторія**  
*Карпатський національний університет ім. В. Стефаника*

## **ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ І ДОВКІЛЛЯ: ВІД ЗАГРОЗ ДО МОЖЛИВОСТЕЙ**

Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту зумовлює суттєві трансформації в різних сферах суспільства, зокрема й у взаємодії людини з довкіллям. З одного боку, штучний інтелект відкриває нові можливості для моніторингу стану природних екосистем, прогнозування змін клімату та оптимізації використання природних ресурсів. З іншого боку, функціонування інтелектуальних систем супроводжується значними енергетичними витратами та зростанням вуглецевого сліду цифрової інфраструктури. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває оцінка екологічних наслідків впровадження ШІ. Важливим є також аналіз потенціалу цих технологій у забезпеченні сталого розвитку та збереженні біорізноманіття.

Метою даного дослідження є узагальнення сучасних підходів до використання ШІ та визначення його впливу на стан довкілля.

В суспільній уяві ШІ часто сприймається як абстрактна хмарна сутність. Проте його функціонування нерозривно пов'язане з масивними обчислювальними потужностями, що споживають величезну кількість електроенергії, прісної води та рідкісних природних ресурсів. На тлі глобальної кліматичної кризи технологія ШІ постає в подвійній ролі: як потужний інструмент для оптимізації енергосистем і моніторингу екосистем та як дедалі вагоміший фактор антропогенного навантаження на планету [1]. Аналіз 2024 – 2025 років свідчить, що без системного регулювання та впровадження принципів «зеленого» ШІ, швидке масштабування

великих мовних моделей (LLM) може поставити під загрозу досягнення цілей Паризької угоди [4].

Найбільш дослідженим аспектом екологічного впливу ШІ є значне використання електроенергії. В перші роки буму генеративного штучного інтелекту увага була зосереджена на енергозатратності навчання LLM. Дані 2025 року вказують на те, що використання інструментів із вбудованим ШІ стає домінуючим фактором споживання електроенергії через масове впровадження технології в повсякденні сервіси [6]. Щоб штучний інтелект міг виконувати поставлені завдання, йому необхідно обробляти величезні масиви даних. Обробка інформації відбувається в центрах обробки даних (ЦОД), які мають великі обчислювальні потужності та потребують значної кількості енергії, при генерації якої утворюються парникові гази. Кожен запит до чат-бота потребує енергії, яка в кілька разів перевищує енергію простого пошуку в інтернеті. Наприклад, 700млн запитів за один день використовує електроенергії, що дорівнює річному споживанню 35000 осель [4]. До 2030 року ЦОД у США можуть споживати більше електроенергії, ніж увесь сектор виробництва енергоємних товарів (цемент, сталь, хімікати) разом узятий [4].

Значні викиди CO<sub>2</sub> – ще один зі суттєвих факторів впливу на навколишнє середовище від штучного інтелекту, хоча неозброєним оком цього не помітити. Звісно, якщо інструменти ШІ живляться з відновлюваної енергетики, викидів менше, проте нині це не повсюдна практика, і по світу переважають так звані традиційні джерела енергії [4].

Вода є ще одним невидимим, але життєво необхідним паливом для інфраструктури ШІ. Більшість ЦОД використовують випаровувальні системи охолодження, де тепло від серверів передається воді, яка потім випаровується в градирнях. Цей процес потребує постійного притоку свіжої прісної води. В середньому, на кожную кіловат-годину спожитої енергії ЦОД потребує близько двох літрів води для охолодження. Очікується, що до 2027 року загальний відбір води для потреб ШІ може скласти від 4.2 до 6.6 мільярдів кубічних метрів, що перевищує річне споживання води такою країною, як Данія [6]. Вчені також підраховали, що один діалог із чатом GPT на 20-50 повідомлень витрачає 0,5 літра води, а таких діалогів одночасно відбувається сотні мільйонів [4].

Для сфери штучного інтелекту характерна тенденція до частого оновлення апаратного забезпечення: нові покоління графічних процесорів з'являються кожні 1-2 роки, унаслідок чого попередні швидко втрачають ефективність для навчання моделей. За прогнозами дослідників Китайської академії наук, до 2030 року ШІ генеруватиме додаткові 2.5 мільйона тонн електронних відходів щороку [6]. Лише 20% електронних відходів переробляються. Більшість обладнання опиняється на сміттєзвалищах у країнах Глобального Півдня. Електронні відходи містять небезпечні хімічні речовини, зокрема свинець, ртуть і кадмій, які вимиваються в ґрунт, забруднюють джерела води, становлять загрозу для біорізноманіття та здоров'я місцевих громад [4].

Але попри значні прямі витрати, ШІ є незамінним інструментом для боротьби зі зміною клімату. Штучний інтелект допомагає ефективніше використовувати відновлювані джерела енергії, навіть попри те, що вони працюють нестабільно. Він аналізує погодні дані та прогнозує, скільки електроенергії буде вироблено сонячними й вітровими станціями. Завдяки цьому енергосистеми можуть краще планувати свою роботу. У результаті зменшується потреба використовувати резервні джерела енергії на викопному паливі.

Штучний інтелект виявився незамінним помічником у веденні сталого сільського господарства, адже може допомогти аналізувати дані про ґрунт, прогнозувати врожайність та виявляти спалахи шкідників і хвороб. Вже не дивина, що на полях для точного виявлення та видалення бур'янів використовується сільськогосподарська техніка на основі штучного інтелекту. Дрони з комп'ютерним зором ідентифікують хвороби окремих дерев, зменшуючи використання хімікатів на 20 – 30%. Вони також допомагають виявляти незаконні вирубки дерев у реальному часі. Платформи аналізують склад ґрунту, дозволяючи вносити добрива на "молекулярному рівні", що зменшує викиди закису азоту (N<sub>2</sub> O) – газу, який у сотні разів небезпечніший за CO<sub>2</sub> [1].

У сфері логістики штучний інтелект завдяки прогностичній аналітиці допомагає оптимізувати маршрути перевезень, що сприяє зменшенню споживання палива та підвищенню ефективності транспортних процесів.

У 2020 році групою дослідників: Roy Schwartz, Jesse Dodge, Noah A. Smith та Oren Etzioni було сформульовано концепцію «Green AI» («Зелений штучний інтелект»), яка передбачає розробку та використання систем штучного інтелекту з урахуванням їхнього впливу на довкілля [5]. Її суть полягає в тому, щоб зменшити енергоспоживання та вуглецевий слід під час створення й використання моделей ШІ, не втрачаючи їхньої ефективності. Традиційно розвиток ШІ орієнтувався переважно на підвищення точності моделей, навіть якщо це вимагало значних обчислювальних ресурсів. Натомість «Green AI» акцентує увагу на балансі між продуктивністю та витратами ресурсів. Ще однією ініціативою є «Зелене кодування» (Green Coding). Це практика розробки ПЗ, що орієнтована на мінімізацію споживання енергії. Основні принципи включають вибір енергоефективних мов програмування (C/Rust замість Python для інтенсивних обчислень). Вуглецево-орієнтоване програмування – при цьому додатки можуть автоматично переносити важкі фонові завдання на час, коли в мережі пік сонячної або вітрової генерації [3].

У межах правового регулювання та стандартизації екологічного впливу систем штучного інтелекту у 2024 – 2025 роках відбувся перехід від добровільних зобов'язань компаній до більш жорсткого державного контролю [2]. Закон ЄС про ШІ є першим комплексним документом, що вводить екологічні вимоги для розробників. Зокрема, провайдери моделей загального призначення, таких як GPT або Gemini, зобов'язані надавати документацію про споживання енергії під час навчання. З 2025 року всі ЦОД у ЄС потужністю понад 500 кВт повинні публічно звітувати про свої показники PUE (Power Usage Effectiveness – показник ефективності використання електроенергії дата-центром) та WUE (Water Usage Effectiveness – показник ефективності використання води) у європейську базу даних [7].

У США було ухвалено Закон про екологічний вплив ШІ, спрямований на регулювання впровадження штучного інтелекту з урахуванням його впливу на довкілля. У рамках цього законодавства Консорціум NIST створює групу експертів для розробки стандартних методик оцінки екологічного сліду систем ШІ. Крім того, Агентство з охорони довкілля (EPA) протягом наступних двох років має підготувати звіт про вплив ШІ на водні ресурси, енергетичні системи та утворення електронних відходів [5].

Екологічний вплив штучного інтелекту є складною, багатошаровою проблемою, яка не має простого технологічного рішення. Матеріальна інфраструктура ШІ – це колосальний споживач енергії та води, що створює локальні екологічні кризи та загрожує глобальним кліматичним цілям. Проте здатність ШІ до радикальної оптимізації ресурсів у промисловості та енергетиці робить його критично важливим для успіху "зеленого переходу".

Безперечно, штучний інтелект – це нові можливості та ризики. У перспективі правильно навчені моделі штучного інтелекту здатні допомогти людству сповільнити зміну клімату, стати більш енергоефективним, сталим у сільському господарстві та навіть врятувати тисячі видів рослин і тварин. Проте все це матиме сенс лише за умови, що вплив штучного інтелекту на довкілля буде максимально низьким. Тому ШІ має працювати виключно від відновлюваних джерел енергії та знаходитися у регіонах із оптимальними умовами для його роботи.

1. Cornell University. (2025). *Roadmap shows environmental impact of AI data center boom*. Nature Sustainability. <https://news.cornell.edu/stories/2025/11/roadmap-shows-environmental-impact-ai-data-center-boom>
2. European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council (Artificial Intelligence Act)*. <https://www.greenai.institute/whitepaper/policy/eu>
3. IBM. (2025). *Green coding*. <https://www.ibm.com/think/topics/green-coding>
4. Jegham, I., et al. (2025). *How Hungry is AI? Benchmarking Energy, Water, and Carbon Footprint of LLM Inference*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2505.09598>

5. Markey, E. (2024). Markey, Heinrich, Eshoo, Beyer Introduce Legislation to Investigate, Measure Environmental Impacts of Artificial Intelligence. <https://www.markey.senate.gov/news/press-releases/markey-heinrich-eshoo-beyer-introduce-legislation-to-investigate-measure-environmental-impacts-of-artificial-intelligence>
6. PwC Belgium. (2025, October 10). The environmental impact of AI and how to mitigate it. <https://www.pwc.be/en/news-publications/2025/responsible-ai-environmental-impact.html>
7. United Nations Development Programme (UNDP). (2025). AI and the climate crisis. <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2025-12/ai-and-the-climate-crisis.pdf>

**Іваночко Марія-Анна, Сіренко Артур**  
**Карпатський національний університет імені Василя Стефаника**

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПОПУЛЯЦІЇ КОЛОРАДСЬКОГО ЖУКА (*LEPTINOTARSA DECAEMLINEATA* SAY, 1824) ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПІДХОДІВ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ**

Ключові слова: колорадський жук, картопля, резистентність, карти поширення, гени, RNAi, біозахист, інтегрований захист

Цей жук з родини листоїдів (*Coleoptera: Chrysomelidae*) з'явився в Україні ще в 1949 році. Він прийшов із Північної Америки, де спочатку харчувався дикою картоплею (*Solanum rostratum*), а потім перейшов на нашу культурну картоплю (*Solanum tuberosum*). Без захисту жук може знищити 20-100% урожаю. Понад 50 (Hare, 1990) Представники виду *Leptinotarsa decemlineata* розмножуються дуже швидко: самка відкладає до 1200 яєць за сезон, а за літо буває 1-2 покоління. (Hare, 1990) Личинки особливо жадібні – вони з'їдають листя, і рослина гине. Дорослі особини можуть перезимувати в ґрунті на глибині 20-50 см і прокинутися навесні.

Головна проблема – резистентність. Колоратський жук навчився чинити опір більшості хімічних засобів захисту. Зараз відомо понад 50 інсектицидів, до яких він стійкий: від старих, як ДДТ, до сучасних неоніконоїдів (наприклад, імідаклоприд) чи хлоротраноліпролу. Це відбувається через гени, які кодують ферменти P450 (вони розкладають отруту в тілі жука), ABC-транспортери (викачують хімікати назовні) та інші зміни в ДНК, як структурні варіації (SV) чи одновимірні поліморфізми (SNP). (Alyokhin et al., 2008)

У цій роботі ми аналізуємо, як жук поширюється в Україні, чому він стає стійким і як з ним боротися без надмірної хімії. Ми використали дані про комп'ютерні моделі (MaxEnt), (Phillips et al., 2006) генетичні аналізи (RNA-seq та Iso-seq) (Clements et al., 2016; Schoville et al., 2018) і навіть експерименти з "мовчанням генів" (RNAi). (Schoville et al., 2018) Мета – створити систему інтегрованого захисту (IPM), де поєднуються біологічні, генетичні та екологічні методи. Це актуально для України, бо клімат змінюється, і жук може поширитися далі на північ чи схід.

Картографування поширення. Ми взяли 34 точки, де бачили жука в Україні (з 1950 по 2025 рік), і 10 точок для його "дикого корму" – *Solanum rostratum*. Використали дані програми MaxEnt (версія 3.4.4) – це модельний інструмент для прогнозування придатності середовища. Він аналізує 19 кліматичних факторів (Phillips et al., 2006) з бази WorldClim 2.1: температура (Bio1 – річна середня), опади (Bio6 – взимку), висота над рівнем моря тощо. Додатково PCA (аналіз головних компонент) показав, які фактори найважливіші. Точність моделі вимірювали AUC.

Генетичний аналіз. Було використано дані, отримані зі зібраних 61 жука з полів (покоління F1–F2); зразки заморожували при –80 °C, а РНК виділяли з личинок 4-ї стадії (L4). Зробили два типи секвенування:

- RNA-seq на Illumina NovaSeq: 6,6 мільярда "букв" генетичного коду (Гб).
- Iso-seq на PacBio Sequel: 34 мільйони баз (Мб) для повних генів. (Clements et al., 2016; Schoville et al., 2018)

Потім анотували гени програмами GeneMark-ET, BRAKER2, BLASTp та InterProScan. Шукали P450-гени (їх 61), ABC-транспорттери (175) і порівнювали з мухами (*Drosophila*) чи жуками (*Tribolium*). WGCNA в R згрупувала 3002 гени в 52 модулі (turquoise – найважливіший для резистентності). TPM>1 – поріг для активних генів. (Zhu et al., 2016; Schoville et al., 2018)

Експерименти з RNAi. RNAi – це коли ми "вимикаємо" гени за допомогою подвійної РНК (dsRNA). Взяли гени CYP4Q3/7, CYP6BQ15 (P450), ABCG, HSP60. Ввели 10 мкг dsRNA в личинок (контроль – PBS-розчин). Слідкували за виживаністю поколінь F1-F2, рахували LT50 (час, коли гине 50%). (Clements et al., 2016; Schoville et al., 2018; Zhu et al., 2016)

Основні результати.

Модель MaxEnt намалювала чітку картину - для колорадського жука придатність середовища – 0,163 в середньому (шкала 0-1). Найважливіші фактори:

1. Біоб (опад взимку) – 24,7%: висока вологість зимового періоду є сприятливим фактором.
2. Біо9/10 (температура найхолоднішого місяця) – обмежують на півночі.

AUC=0,960 – модель передбачає на 96%! Для *Solanum rostratum* (джерело інвазії) AUC=0,934, ключ – Біо1 (різна температура, 53,1%). Статистика  $p<0,01$  – різниця значуща. PCA пояснила 93% варіацій: PC1 – температура, PC2 – опади. (Phillips et al., 2006)

Прогноз. У травні-червні жук активний за температури 15-25°C. До 2030 року зона ризику зросте на 10-30% через потепління. В Україні – Полісся, Лісостеп, степ у небезпеці. (Schoville et al., 2018)

Гени резистентності. RNA-seq дало 17 тисяч транскриптів, Iso-seq – повні гени. Знайшли:

- 61 ген P450 (сімейства CYP4, CYP6): CYP4Q3/7 розкладають імідаклоприд.
- 175 ABC-транспорттерів: викачують отруту.
- WGCNA: 52 модулі, turquoise (3002 гени) активний у стійких жуках.

Структурні зміни. 221 SV (50+ бп), SNP з  $\pi=0,042-0,06$ . CYP4G15/113 мають індекс PI>3 – еволюціонують швидко. F2-покоління стійкіші за F1. Це пояснює, чому хімія перестає працювати через 5-10 років. (Zhu et al., 2016; Schoville et al., 2018)

RNAi-експерименти. dsRNA для P450 знизило виживаність на 50% у F1, 80% у F2. LT50 скоротився на 60%. HSP60 (тепловий шок) – жук гине при стресі. ABC – личинки не ростуть. Контроль (PBS) – 100% виживання. (Zhu et al., 2016) Метод характеризується високою ефективністю - синтезувати dsRNA і обприскувати поля.

ІПМ у дії. Біоагенти:

- *Edovum puttleri* паразитує яйця – 40-60%.
- Bt (*Bacillus thuringiensis*) – 60-100% проти личинок. (Lacey & Kaya, 2007)
- Сонечка та клопи – 58% контроль.

Комбінація Bt + ротація – 70-90%. Історія України: 1949 – перша інвазія, 2025 – ІПМ зменшив хімію на 50%. (Lacey & Kaya, 2007)

Висновки.

Колорадський жук (*Leptinotarsa decemlineata* Say, 1824) залишається одним з найсерйозніших викликів для українського картоплярства, але сучасні наукові підходи дозволяють перетворити цю проблему на можливість для сталого розвитку. Наша курсова робота комплексно розкрила ключові аспекти: від історичної інвазії 1949 р. та еколого-кліматичного моделювання (MaxEnt з AUC 0,960, де Біоб визначає 24,7% ніші) до геномних основ резистентності (61 P450-генів, 175 ABC-транспорттерів, SV/SNP з  $\pi=0,042-0,06$ ) і перспективних стратегій контролю. (Hare, 1990)

Виявлені генетичні маркери (CYP4Q3/7, CYP6BQ15 у turquoise-модулі WGCNA) та моделі поширення з *S. rostratum* як резервуаром пояснюють адаптивність жука до 50+

інсектицидів і прогнозують зростання зон ризику на 10–30% до 2030 р. через кліматичні зміни. RNAi-експерименти продемонстрували зниження виживання на 50–80% (LT50 -60% у F2), що відкриває шлях до нехімічних dsRNA-спреїв. (Schoville et al., 2018)

Інтегрована система IPM (ефективність 70–90%) зменшує хімічне навантаження з 600 кг/га (1945 р.) до сучасних 20–50%, зберігаючи врожайність і біорізноманіття. Рекомендації для України: регіональний моніторинг (34+ точки), стійкі сорти картоплі в "червоних" зонах MaxEnt, впровадження RNAi-Bt з 2026 р. (Alyokhin et al., 2008)

Подальші дослідження – CRISP/R-редакція SV, польові випробування dsRNA, динамічні моделі CLIMEX для 2050 р. Ця робота не лише поглиблює розуміння еволюції шкідника, а й пропонує науково обґрунтований шлях до "зеленого" агровиробництва, де екологія, генетика та практика гармонійно поєднуються для майбутніх поколінь фермерів.

1. Alyokhin, A., Baker, M., Mota-Sanchez, D., Dively, G., & Grafius, E. (2008). Colorado potato beetle resistance to insecticides. *American Journal of Potato Research*, 85(6), 395–413. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9052-0>

2. Clements, J., Schoville, S., Peterson, N., Lan, Q., Groves, R., & Werren, J. (2016). The genome of the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *Scientific Reports*, 6, 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep33274>

3. Hare, J. D. (1990). Ecology and management of the Colorado potato beetle. *Annual Review of Entomology*, 35, 81–100. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.35.010190.000501>

4. Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>

5. Schoville, S. D., Chen, Y. H., Andersson, M. N., Benoit, J. B., Bhandari, A., Bowsher, J. H., et al. (2018). A model species for agricultural pest genomics: The Colorado potato beetle. *Annual Review of Entomology*, 63, 125–144. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043210>

6. Zhu, F., Moural, T. W., Nelson, D. R., & Palli, S. R. (2016). A specialist herbivore pest adaptation to xenobiotics through up-regulation of multiple cytochrome P450 genes. *Scientific Reports*, 6, 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep20421>

7. Lacey, L. A., & Kaya, H. K. (2007). Field manual of techniques in invertebrate pathology. Springer.

**Казимира Ірина, Голяк Марко**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**

## **МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК ДЛЯ МОНІТОРИНГУ БІОРІЗНОМАНІТТЯ**

Біорізноманіття є одним із ключових показників стану екосистем та важливим об'єктом дослідження у природоохоронній діяльності. Його збереження та ефективний моніторинг є необхідними умовами сталого розвитку, підтримки екологічної рівноваги та запобігання деградації природних середовищ. Сучасні підходи до моніторингу біорізноманіття ґрунтуються на використанні геоінформаційних систем (GIS), мобільних технологій, хмарних обчислень та методів інтелектуального аналізу даних. У цьому контексті важливим є розвиток напряму інформатики біорізноманіття (biodiversity informatics), який забезпечує інтеграцію біологічних, просторових і часових даних для підтримки наукових досліджень та управлінських рішень у сфері охорони природи. Використання таких підходів дозволяє перейти від фрагментованих спостережень до комплексних цифрових систем моніторингу.

Системи моніторингу біорізноманіття в Україні перебувають у стадії активного розвитку, проте їх створення потребує значних часових ресурсів. Навіть у розвинутому вигляді

такі системи охоплюють лише частину біорізноманіття, що зумовлено великою кількістю потенційних об'єктів моніторингу, а також фінансовими й іншими обмеженнями [1]. Розроблення систем моніторингу має орієнтуватися, зокрема, на впровадження сучасних методів збору, накопичення, аналізу даних і обміну інформацією (ГІС-технології, вебтехнології, хмарні технології, мобільні сервіси тощо), а також передбачати залучення не лише вузькопрофільних фахівців (біологів, екологів, географів тощо), але й широкого кола громадян і волонтерів до процесу наповнення таких систем даними.

Особливу роль у цьому відіграють геоінформаційні технології, які забезпечують роботу з просторово прив'язаними даними. Сучасні ГІС дозволяють інтегрувати різноманітні джерела інформації, візуалізувати їх у вигляді картографічних моделей та здійснювати просторовий аналіз. Розвиток мобільного картографування значно розширює ці можливості, оскільки дозволяє здійснювати збір геоданих безпосередньо в польових умовах. Використання сенсорів, глобальних навігаційних супутникових систем та мобільних пристроїв забезпечує високу точність і оперативність отримання інформації [2]. Паралельно з розвитком технологій відбувається зміна підходів до організації збору даних. Значного поширення набуває концепція громадянської науки (citizen science), яка передбачає залучення широкого кола користувачів до процесу спостереження за станом довкілля. Такий підхід дозволяє значно збільшити обсяг доступних даних та забезпечити їх оперативне оновлення [3]. Концепція «citizens as sensors» розглядає користувачів як джерело геопросторової інформації, що формує великі масиви даних, які можуть ефективно інтегруватися у геоінформаційні системи [4].

Практичне застосування зазначених підходів реалізується у сучасних мобільних застосунках, таких як iNaturalist [5] та Observation.org [6]. Дані системи дозволяють користувачам фіксувати спостереження видів із прив'язкою до географічних координат, накопичувати інформацію та використовувати її для подальшого аналізу. Крім того, вони демонструють ефективність поєднання мобільних технологій і ГІС для вирішення задач моніторингу біорізноманіття.

Водночас аналіз існуючих рішень показує наявність певних обмежень. Зокрема, значна частина таких систем орієнтована на глобальний рівень і недостатньо враховує специфіку окремих природоохоронних територій. Крім того, спостерігається неоднорідність якості даних, що надходять від користувачів, а також відсутність чіткої структуризації інформації відповідно до адміністративних або екологічних меж. У багатьох випадках також відсутні інструменти для ефективного управління доступом до даних та їх валідації.

Таким чином, актуальним є завдання розроблення спеціалізованих інформаційних систем, орієнтованих на моніторинг біорізноманіття в межах конкретних природоохоронних об'єктів. Одним із перспективних напрямів є створення мобільних застосунків, які поєднують функціональність геоінформаційних систем із зручністю використання у польових умовах.

Метою роботи є розроблення концепції та програмної реалізації мобільного застосунку для моніторингу біорізноманіття флори природоохоронних об'єктів на основі використання сучасних геоінформаційних технологій. Основна ідея полягає у створенні єдиної цифрової системи, яка дозволяє інтегрувати дані про території, зони спостереження та результати моніторингу в єдиному інформаційному середовищі. Такий підхід забезпечує перехід від розрізнених польових записів до структурованої системи, що містить інтерактивну карту, цифрові контури заповідників, зони моніторингу та детальну історію спостережень.

Необхідність розроблення такого застосунку обумовлена низкою проблем, характерних для традиційних підходів до моніторингу: зберігання даних у різних форматах, включаючи паперові носії; складність оперативної геоприв'язки спостережень; обмежені можливості аналізу змін у часовому розрізі; відсутність централізованого управління доступом до даних; низький рівень інтеграції між різними інформаційними системами.

Запропонований мобільний застосунок базується на картографічному підході до організації даних та передбачає використання ієрархічної структури: «заповідник – зони моніторингу – спостереження». Така структура дозволяє більш точно відображати просторову організацію природоохоронних територій та забезпечує зручність роботи користувачів із

даними. Система повинна забезпечувати диференційований доступ для різних категорій користувачів, що дасть змогу контролювати якість даних та ефективно управляти інформацією, зокрема: гість (перегляд загальної інформації без реєстрації); зареєстрований користувач (доступ до персоналізованих функцій); супервізор (управління зонами моніторингу та внесення даних); адміністратор (повний контроль над структурою системи).

Основні функціональні можливості мобільного застосунку такі:

- відображення меж природоохоронних територій на інтерактивній карті;
- створення та редагування геопросторових об'єктів;
- фіксацію спостережень за видами із прив'язкою до координат;
- збереження історії змін і проведення аналізу у часовому розрізі;
- забезпечення навігації користувача в польових умовах.

Технологічна реалізація застосунку передбачає використання сучасних кросплатформних технологій, зокрема React Native та Expo, що забезпечують можливість розгортання на різних мобільних платформах. Інтеграція з серверною частиною дозволяє реалізувати централізоване збереження даних, синхронізацію та підтримку багатокористувацького режиму. У перспективі передбачено розширення функціональності системи шляхом впровадження офлайн-режиму роботи, автоматизованого формування звітів, а також використання методів штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання рослин.

Використання геоінформаційних технологій у поєднанні з мобільними застосунками створює нові можливості для підвищення ефективності моніторингу біорізноманіття. Запропонований підхід дозволяє забезпечити системність, доступність та актуальність екологічних даних, необхідних для прийняття обґрунтованих рішень у сфері охорони природи.

1. Костюшин, В.А., Губар, С.І., Домашнінець, В.Г. (2009) Стратегія розвитку моніторингу біорізноманіття в Україні. Київ, 2009. <https://uncg.org.ua/wp-content/strategy.pdf>
2. Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. (2009). Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
3. Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211–221. <https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y>
4. Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., & Chen, Y. (2012). Mobile mapping system and its performance. *Remote Sensing*, 4(10), 3073–3087. <https://doi.org/10.3390/rs4103073>
5. iNaturalist. (n.d.). <https://www.inaturalist.org>
6. Observation.org. (n.d.). <https://observation.org>

**Касіянчук Дмитро, Домбровська Олександра, Вінтонів Вікторія, Карас Андрій**  
*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

## **ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ В ОЦІНЦІ СТАНУ ДОВКІЛЛЯ: КАРТОГРАФІЧНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ДОРОЖНЬОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В СКЛАДНИХ ГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ**

Сучасні підходи до оцінки стану довкілля передбачають активне використання геоінформаційних систем, які забезпечують інтеграцію, аналіз і картографічну інтерпретацію просторових даних. Особливої актуальності це набуває для гірських територій, де складна геологічна будова та морфометрична неоднорідність рельєфу формують специфічні умови функціонування природного середовища. Геоінформаційні системи (ГІС) є ефективним інструментом дослідження довкілля, оскільки дозволяють інтегрувати різноманітні просторові дані, здійснювати їх аналіз і забезпечувати картографічну інтерпретацію результатів (Tarolli,

2014). Використання цифрового геоінформаційного картографування дає змогу перейти від описових характеристик до кількісної оцінки просторових структур.

Об'єктом дослідження є ділянка дорожньої інфраструктури, що формує так зване «золоте кільце» в межах Івано-Франківської області (рис. 1).



Рисунок 1. Схема району дослідження та просторове положення автомобільного маршруту «золоте кільце» у межах Івано-Франківської області

Даний маршрут охоплює гірські території Українських Карпат і проходить через низку населених пунктів, зокрема Ворохту, Верховину, Косів, Коломию та Делятин. Просторова конфігурація маршруту та умови його проходження обумовлені складним рельєфом і виступають відображенням природних обмежень території.

У цьому контексті дорожня інфраструктура розглядається не лише як інженерний об'єкт, а як елемент, що акумулює інформацію про морфометричні та геологічні особливості середовища. Геометричні параметри дороги, зокрема поздовжні ухили, формуються під впливом рельєфу, що дозволяє використовувати їх як індикатор просторової структури довкілля.

Метою роботи є обґрунтування можливостей геоінформаційного картографування для аналізу стану довкілля на основі дослідження просторових характеристик дорожньої інфраструктури.

Дослідження базується на використанні цифрової моделі рельєфу як основи для отримання морфометричних характеристик території. Цифрові моделі рельєфу широко застосовуються для аналізу просторових процесів і забезпечують високу деталізацію досліджень (Tarolli, 2014).

Дорожня інфраструктура представлена у вигляді лінійного об'єкта, який піддано сегментації з метою аналізу локальних змін геометричних параметрів. Такий підхід дозволяє враховувати просторову мінливість умов формування траси.

На основі цифрової моделі рельєфу розраховано поздовжні ухили дорожнього полотна. Отримані значення використано для побудови тематичних карт, що відображають просторовий розподіл показника.

Для дослідження просторової структури застосовано метод локальної просторової автокореляції (LISA), який дозволяє виявляти кластери однорідних значень і оцінювати їх просторову взаємозалежність (Anselin, 1995). Використання цього підходу є ефективним для аналізу просторових закономірностей у геоінформаційних дослідженнях (Getis & Ord, 1992).

Картографічне моделювання результатів забезпечує можливість їх інтерпретації та виявлення зон із підвищеними значеннями досліджуваного показника.

Результати картографічного моделювання поздовжніх ухилів сегмента автодороги Р-24 відображено на рисунку 2. Побудована карта дозволяє оцінити просторовий розподіл показника та виділити ділянки з його підвищеними значеннями.

Аналіз отриманих результатів показав, що 79.5% сегментів дороги характеризуються значеннями, які відповідають нормативним обмеженням. Водночас 20.5% ділянок мають перевищення допустимих значень, з яких 13.6% належать до критичних.

Просторовий розподіл таких ділянок є нерівномірним і характеризується наявністю локалізованих зон концентрації. Це підтверджується результатами LISA-аналізу, який дозволив виявити статистично значущі кластери підвищених значень.

Виділені кластери типу High-High відображають ділянки з високими значеннями ухилу, що групуються в межах обмежених територій. Такі структури свідчать про просторову впорядкованість досліджуваного показника та його залежність від морфометричних характеристик рельєфу.

З позицій картографічного підходу отримані результати можуть бути інтерпретовані як відображення інженерно-геологічних обмежень території. Картографічні моделі дозволяють не лише візуалізувати дані, але й виявляти закономірності їх просторової організації.

Застосування геоінформаційних систем у поєднанні з методами просторового аналізу дозволяє отримати більш повне уявлення про структуру досліджуваного середовища. Використання LISA-аналізу є ефективним інструментом для виявлення локальних просторових закономірностей і кластерів (Anselin, 1995).

Картографічний підхід забезпечує інтеграцію результатів аналізу та їх інтерпретацію у вигляді просторових моделей. Це дозволяє розглядати територію як цілісну систему, в якій інфраструктурні об'єкти відображають вплив природних умов.

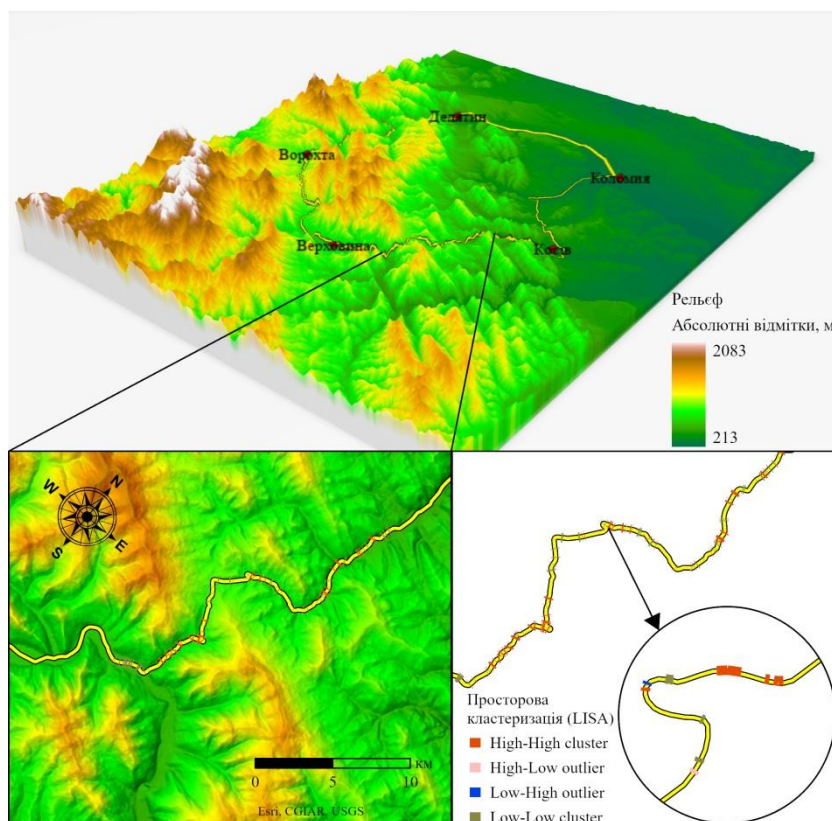


Рисунок 2. Кластеризація поздовжнього ухилу дорожніх сегментів за результатами індексу Moran (LISA)

Отримані результати картографічного аналізу поздовжніх ухилів показали, що більшість сегментів досліджуваної дороги характеризуються значеннями, які відповідають нормативним

вимогам. Зокрема, 79.5% ділянок мають ухили до 10%, що узгоджується з вимогами до автомобільних доріг III–IV категорії в гірських умовах (ДБН В.2.3-4:2015, 2016). Це свідчить про загальну відповідність геометрії траси базовим принципам проектування гірських доріг.

Разом з тим, частина сегментів (6.9%) характеризується ухилами в межах 10–12%, що перевищує рекомендовані значення, однак може розглядатися як допустиме відхилення в умовах складного рельєфу. Подібні ситуації є типовими для гірських територій, де геометричні параметри інфраструктури формуються в умовах обмежень рельєфу та потребують компромісних інженерних рішень (Zhang et al., 2021; Pantha et al., 2010).

Особливу увагу привертають ділянки з ухилами понад 12%, частка яких становить 13.6%. Такі значення виходять за межі допустимих і свідчать про наявність системних відхилень, обумовлених морфометричними особливостями території. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що в умовах складної геологічної будови фактичні параметри дорожньої мережі можуть істотно відрізнятись від нормативних через вплив природних факторів (Aleksandrovych et al., 2022).

З позицій картографічного підходу принципово важливим є встановлення просторової структури таких відхилень. Результати LISA-аналізу підтверджують наявність статистично значущих кластерів підвищених значень поздовжніх ухилів. Виділені зони типу High–High відображають локалізовані ділянки концентрації високих значень, що формують просторово впорядковану структуру.

Інтерпретація отриманих результатів свідчить, що такі кластери приурочені до морфологічно складних елементів рельєфу, зокрема ділянок із підвищеною крутизною та значними перепадами висот. Це узгоджується з підходами, відповідно до яких рельєф виступає ключовим фактором просторової диференціації природно-техногенних систем (Tarolli, 2014; Passalacqua et al., 2014).

Таким чином, картографування поздовжніх ухилів у поєднанні з методами просторового аналізу дозволяє не лише оцінити відповідність інфраструктури нормативним вимогам, але й виявити закономірності її просторової організації. Це підтверджує ефективність використання геоінформаційних систем як інструменту дослідження довкілля в умовах складної геологічної будови.

*Висновки.* Геоінформаційні системи є ефективним інструментом аналізу стану довкілля в умовах складної геологічної будови. Використання картографічного підходу дозволяє виявляти просторові закономірності та інтерпретувати їх у контексті природних умов.

Встановлено, що поздовжні ухили дорожньої інфраструктури мають нерівномірний розподіл і формують локальні кластери підвищених значень. Застосування LISA-аналізу дозволило виявити просторову впорядкованість показника та підтвердити його залежність від морфометричних характеристик рельєфу.

Запропонований підхід демонструє ефективність використання цифрового геоінформаційного картографування для дослідження довкілля та може бути застосований для вирішення прикладних задач аналізу територій.

1. ДБН В.2.3-4:2015. (2016). Автомобільні дороги. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України.

2. Aleksandrovych, V., Havryliuk, O., & Sukhov, V. (2022). The impact of complex engineering and geological conditions on the durability of the polymer pipeline. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (57), 8-16. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-01>

3. Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association–LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>

4. Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>

5. Khelifa, M., Yousefi, S., & Pourghasemi, H. R. (2021). GIS-based assessment of road network characteristics in mountainous regions. *Natural Hazards*, 107, 215–233. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09086-9>
6. Pantha, B. R., Yatabe, R., Bhandary, N. P., & Dahal, R. K. (2010). GIS-based highway maintenance prioritization model for mountain roads. *Engineering Geology*, 114(3–4), 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.06.016>
7. Passalacqua, P., Hillier, J., & Tarolli, P. (2014). Innovative analysis and use of high-resolution DTMs for quantitative interrogation of Earth-surface processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(11), 1400–1403. <https://doi.org/10.1002/esp.3616>
8. Tarolli, P. (2014). High-resolution topography for understanding Earth surface processes. *Geomorphology*, 216, 295–312. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.008>
9. Zhang, S., Li, T., & Zhang, Q. (2021). GIS-based analysis of road geometry in mountainous terrain. *Sustainability*, 13(4), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106172>

**Kryshtop Yevhen**  
*State Biotechnological University*

## **WASTE-TO-RESOURCE: DIGITAL TECHNOLOGIES FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT AND WASTE MANAGEMENT SYSTEMS OPTIMIZATION**

**Introduction.** According to Eurostat (2025), municipal solid waste generation in the European Union reached 511 kg per capita in 2023, with a recycling rate of 48.0 %; nevertheless, 22.5 % of waste continues to be landfilled [1]. Against the backdrop of the Circular Economy Action Plan (2020) and EU Directive 2018/851 – which establishes binding recycling targets of 55 % by 2025, 60 % by 2030, and 65 % by 2035 [2] – waste management has acquired strategic importance for achieving climate neutrality by 2050. The waste-to-resource concept requires the maximum extraction of material and energy value from waste streams prior to final disposal and necessitates rigorous quantitative assessment of the environmental consequences of alternative technological solutions.

Life cycle assessment (LCA) constitutes the standardised instrument for such evaluation under ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006 [3, 4]; however, within the context of dynamic waste management systems it exhibits fundamental limitations [5]. These encompass: (i) the static nature of inventory data – standard databases (ecoinvent, ELCD) contain average values that do not capture seasonal and spatial variability in the morphological composition of waste streams; (ii) the high labour intensity of primary data collection, which precludes regular updating of LCA models; and (iii) the absence of a feedback mechanism between LCA results and operational decisions, which relegates the method to a purely retrospective analytical tool.

**Objective.** To determine the role of digital technologies – geographic information systems (GIS), Internet of Things (IoT), and machine learning (ML) algorithms – as structural components of dynamic LCA in waste management systems focused on waste-to-resource performance indicators, and to identify the conditions for their effective implementation.

**Methodological Approach.** A substantial share of published research employs GIS, IoT, or machine learning algorithms as isolated solutions for discrete tasks, without integrating them into a closed analytical loop of «real-time data acquisition – dynamic inventory – LCA – scenario modeling – management decision-making». Within classical life cycle assessment frameworks, the mechanisms for integrating such digital components into a unified analytical system remain insufficiently developed, thereby constraining the transition from static to dynamic assessment models [6]. Contemporary waste management research further underscores data fragmentation and the absence of integrated evaluation systems, which impedes the formation of coherent analytical solutions [7]. This points to a methodological gap that limits the scalability of waste-to-resource approaches.

The proposed framework is structured across three interrelated functional tiers:

Tier 1 – Spatial analysis and waste flow inventory via GIS. The overlay of land-use, transport network, demographic, and waste-processing facility layers produces spatially differentiated inventory datasets with substantially higher resolution than aggregated regional statistics. Logistical components within the «transport» impact category can be quantified at the level of individual routes rather than mean distances.

Tier 2 – Operational IoT monitoring of process parameters. Sensor networks generate continuous time series data on container fill levels, temperature, moisture content, and substrate chemical composition. In composting systems, temperature deviations from the optimal range of 55–65 °C lead to elevated specific N<sub>2</sub>O emissions – a greenhouse gas with a global warming potential 265 times that of CO<sub>2</sub> [6]. Parameterising LCA models with dynamic IoT data improves the correspondence of results to the actual environmental profile of the facility.

Tier 3 – Predictive analytics based on machine learning algorithms. Gradient boosting algorithms (XGBoost) and long short-term memory (LSTM) recurrent neural networks achieve a mean absolute percentage error (MAPE) of 8–12 % over a 30-day forecasting horizon, incorporating seasonal and socio-demographic covariates, as demonstrated by a synthesis of current research. This enables ex ante scenario-based LCA – the assessment of environmental impacts prior to the adoption of technological decisions.

Together, these three tiers constitute an integrated analytical framework that forms the basis for the subsequent results and synthesis.

**Results.** The results presented are of a generalised analytical nature and are derived from a synthesis of published methodological approaches and validated case studies. At the same time, the proposed framework demonstrates practical applicability to Ukrainian municipal waste management systems, particularly in large urban agglomerations with developing digital monitoring infrastructure.

The proposed framework directly addresses the three identified limitations of conventional LCA:

- (i) static inventory data,
- (ii) labour-intensive data collection, and
- (iii) lack of feedback mechanisms.

Although based on a synthesis of existing studies, the findings are supported by evidence from recent empirical research across multiple waste management contexts.

The principal outcome is the proposed closed analytical loop: digital real-time data (IoT + GIS) → dynamic LCA inventory → scenario analysis (ML-based forecasting) → management decision-making → monitoring of actual environmental outcomes → model revision. This loop enables the incorporation of temporal variability in inventory data as compared to conventional static LCA.

Three levels of integration ambition were identified: (1) automated data collection without modification of LCA architecture; (2) parameterisation of individual modules with dynamic data while retaining a static overall structure; and (3) complete reconstruction of LCA as a dynamic system with near-real-time inventory updating. The majority of industrial case studies implement levels 1 or 2; bridging the gap between research application and practical deployment remains a factor constraining adoption in waste-to-resource industrial settings [6].

For biogas production systems, IoT monitoring of substrate composition combined with GIS-based logistics analysis and ML forecasting has been shown to improve LCA accuracy in the climate change impact category by 15–30 % relative to the standard approach [8]. Automation of primary data collection may reduce inventory report preparation time by a factor of three to four.

For composting systems, ML classifiers based on near-infrared (NIR) sensors are capable of determining the C/N ratio of the input stream in real time. Replacing tabulated coefficients with actual spectral data alters calculated eutrophication potential values by 15–30 % depending on the season – a critical factor when substantiating the environmental labelling of compost [6].

For municipal solid waste landfills, IoT sensor networks monitoring gas emissions (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) and leachate provide input data for dynamic inventory of the end-of-life module. Machine learning models can forecast the annual CH<sub>4</sub> emission profile over a 10–15-year horizon with a MAPE of 9–14 % based on a synthesis of current studies, thereby supporting investment decisions concerning

gas recovery systems with a projected CO<sub>2</sub>-equivalent reduction of 30–45 %, consistent with findings from recent research [9].

A systemic barrier to scaling the approach remains the absence of standardised data exchange protocols between IoT infrastructure and LCA software (SimaPro, OpenLCA). The application of semantic ontologies to build an interoperable bridge between operational and analytical systems represents a viable pathway, aligned with the objectives of the European Green Deal with respect to the digital transformation of environmental management [10].

**Scientific Novelty.** The concept of dynamic digital LCA is proposed as an integrated analytical loop in which GIS, IoT, and machine learning algorithms function as structural components that facilitate the transition from static retrospective analysis to decision-support approaches in waste-to-resource systems. The conditions necessary to ensure continuous inventory updating and the implementation of ex ante scenario analysis based on predictive machine learning models are defined.

**Conclusions.** An integrated analytical loop – GIS + IoT + ML → dynamic LCA – is proposed that systematically addresses three key limitations of the conventional approach: the static character of inventory data, the labour intensity of primary data collection, and the inability to conduct operational scenario analysis. Case studies of biogas systems, composting facilities, and landfills demonstrate the potential to improve LCA accuracy by 15–30 % and to reduce report preparation time by a factor of three to four. The transition to dynamic LCA redefines the functional role of the method – from retrospective analysis (ex post) to a decision-support instrument – enabling its integration into digital monitoring platforms for urban waste management systems.

1. Eurostat. (2025). Municipal waste statistics. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics)
2. European Parliament and Council of the European Union. (2018). Directive (EU) 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on waste. Official Journal of the European Union. <https://data.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>
3. International Organization for Standardization. (2006). ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
4. International Organization for Standardization. (2006). ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. ISO. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
5. Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., Hauschild, M. Z., & Christensen, T. H. (2014). Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I: Lessons learned and perspectives. Waste Management, 34(3), 573–588. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
6. Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (Eds.). (2018). Life cycle assessment: Theory and practice. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
7. Bringhenti, J. R., Zanin Günther, W. M., & Ferreira da Silva, L. A. (2024). Sustainability indicators framework for waste management policies using the DPSIR framework. Sustainability, 16(5), 2192. <https://doi.org/10.3390/su16052192>
8. European Environment Agency. (2023). Circular economy in Europe: State and outlook 2023. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/circular-economy>
9. Askr, H., et al. (2024). Prediction of methane emission and electricity generation from landfills using deep learning. Energy Reports. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.025>
10. European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe (COM(2020) 98 final). [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en)

## **USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO FORECAST THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON ENVIRONMENTAL SECURITY OF SOCIETY**

Climate change and the associated environmental threats represent a key foundation for the study of natural processes, identification of long-term trends, assessment of environmental risks, and development of modern machine learning-based forecasting models. The accuracy of analytical conclusions, as well as the effectiveness of statistical methods and machine learning algorithms, depends on the quality, completeness, and reliability of the underlying data. Given that the climate system is characterized by high complexity, nonlinearity, and multifactorial interactions, its adequate modeling is only possible through the use of datasets that cover long time intervals and diverse environmental conditions. In this context, particular importance is placed on data structuring, identification of data sources, selection of appropriate data representation methods, and their application in the formation of integrated indicators and predictive models.

Information on climate change is generated based on multi-level observations and calculations, including ground-based measurements, satellite monitoring, automated data collection systems, as well as results of global climate modeling. International organizations play a significant role in the accumulation, standardization, and dissemination of such data, in particular the World Meteorological Organization, which coordinates global climate observations; the Intergovernmental Panel on Climate Change, which provides scientific assessments of climate change and its impacts; and the United Nations Environment Program, which addresses environmental policy and sustainable development issues. A substantial contribution to the formation of climate databases is also made by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, the National Oceanic and Atmospheric Administration of the United States, and the UK Meteorological Office, which provide high-quality long-term observations and climate models.

To develop effective monitoring and forecasting systems for assessing the impact of climate change on the environment, long-term aggregated indicators are used, presented in the form of structured datasets [1]. Such datasets typically include temporal indicators, temperature characteristics, precipitation levels, wind and humidity parameters, atmospheric pressure, and other variables that enable the assessment of both gradual climate changes and extreme events. A key requirement is the proper organization of these data: temporal variables are transformed into numerical features (e.g., year, month, day of year), which allows for the consideration of seasonal variations, cycles, and long-term trends.

The use of long-term climate change data provides broad opportunities for analysis, including:

- the study of cycles in natural processes and the determination of the periodicity of extreme events;
- the identification of long-term trends, in particular global warming and changes in precipitation regimes;
- the analysis of spatial differentiation of climate change across different regions;
- the improvement of predictive model accuracy through the use of large historical datasets and ensembles of machine learning algorithms.

At the same time, climate change data exhibit several specific characteristics that must be considered during data preprocessing. Due to technical limitations, changes in observation methodologies, or the influence of natural factors, missing values, irregularity, or noise may occur in the data. This necessitates the application of specialized preprocessing techniques such as interpolation, smoothing, normalization, or feature selection. For example, moving average methods or linear interpolation are widely used in the analysis of temperature variations, whereas the absence of precipitation may be interpreted as a zero value with physical meaning [2].

A significant characteristic of climate processes is their pronounced seasonality, which leads to the regular repetition of natural phenomena throughout the year. To properly account for this effect in machine learning models, variables representing calendar cycles are introduced in the form of months, quarters, or seasons. In more advanced approaches, harmonic transformations are also applied, allowing for a more accurate representation of the cyclical nature of changes.

Long-term climate change trends are manifested through an increase in average annual temperatures, changes in precipitation regimes, and a growing frequency and intensity of extreme events such as droughts, floods, hurricanes, and heat waves. These processes pose a serious threat to natural ecosystems, agriculture, water resources, and the socio-economic stability of regions. At the same time, climate processes are non-stationary, as they continuously evolve under the influence of both natural and anthropogenic factors.

In addition, it is important to consider the spatial heterogeneity of climate change. The impact of climatic factors strongly depends on geographical location, terrain, altitude above sea level, the presence of water bodies, and the type of land surface. This necessitates the integration of spatial data and the use of geographic information systems in combination with machine learning methods.

In contemporary research, increasingly sophisticated approaches are being applied, including neural networks, ensemble methods, and hybrid models that integrate physical climate calculations with artificial intelligence algorithms. This not only improves the accuracy of forecasts but also enables a deeper understanding of the mechanisms underlying the formation of climate-related risks.

Thus, long-term climate change data and its environmental impacts, complemented by the activities of international organizations, constitute a fundamental basis for the development of effective monitoring systems, risk assessment, and forecasting of future changes. Proper processing and interpretation of such data contribute to timely responses to environmental challenges and the formulation of sustainable development strategies.

For machine learning-based forecasting of the impacts of climate change, artificial intelligence can be effectively applied, as meteorological variables are inherently multifactorial and result from the interaction of atmospheric, hydrological, geographical, and global processes. Traditional models for forecasting the impacts of climate change are based on time series analysis [3]. Other models used in practice include exponential smoothing methods, which are particularly suitable for handling data with seasonal dependencies. Machine learning enables the automatic detection of patterns in data and the processing of large datasets without the need for complex prior assumptions.

The most common machine learning approaches include linear and polynomial regression models. Polynomial regression better captures complex relationships between climatic factors compared to linear regression; however, its application is limited by the significant increase in the number of parameters as the polynomial degree grows. Decision tree models are also effective, as they enable the construction of models that capture complex nonlinear relationships between features [4].

Another direction in the application of artificial intelligence is the forecasting of climate change impacts using neural networks, which are capable of modeling complex temporal dependencies and processing large volumes of data. However, their use in real-world monitoring systems is limited by the difficulty of interpreting the results.

For the design of an information system for monitoring the impact of climate change, a client–server architecture is appropriate, in which the frontend component generates a time scale for future periods, allowing users to specify the forecasting horizon, while the backend performs machine learning-based prediction of climatic variables for the selected dates. This approach enables the integration of new algorithms without modifying the system architecture.

Climate change is a complex, multifactorial process, the analysis and forecasting of which require large volumes of high-quality, long-term, and structured data. The reliability of research results directly depends on the completeness, accuracy, and proper preprocessing of the data, including cleaning, normalization, and handling of missing values and noise.

In conclusion, it should be noted that effective study of climate processes is only possible through the integration of heterogeneous data sources, including ground-based observations, satellite data, and results of global modeling. Climate change is a complex, nonlinear, and multifactorial

process manifested in long-term changes in temperature, precipitation regimes, and an increasing frequency of extreme events. Its analysis requires the use of large volumes of heterogeneous data characterized by seasonality, cyclical, and spatiotemporal variability, which complicates their processing and modeling.

In this context, artificial intelligence serves as a key tool for processing climate data and developing predictive models. Machine learning methods enable the automatic detection of hidden patterns, the consideration of complex relationships between climatic factors, and the processing of large datasets without the need for strict a priori assumptions. Regression models, decision trees, ensemble methods, and neural networks demonstrate particular effectiveness, as they are capable of modeling both linear and nonlinear dependencies.

The use of artificial intelligence enables improved accuracy in climate change forecasting, timely detection of environmental risks, and assessment of their potential impact on natural and socio-economic systems. At the same time, the quality of input data and the interpretability of model results remain critical issues, particularly in the case of complex algorithms such as neural networks.

Thus, the integration of climate research and artificial intelligence technologies opens new opportunities for a deeper understanding of natural processes, enhancing the effectiveness of monitoring systems, and supporting evidence-based decision-making in climate change adaptation and sustainable development.

1. Havryliuk, O. M., & Kovalchuk, P. V. (2021). *Systemy monitorynhu navkolyshnoho seredovyscha: osnovy proektuvannia ta realizatsiia* [Environmental monitoring systems: fundamentals of design and implementation]. Tekhnika.

2. Kornienko, D., & Golian, N. (2024). Automatic machine learning methods usage to predict natural phenomena. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 60–67. <https://doi.org/10.15589/it.v2i2.587>

3. Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2015). *Introduction to time series analysis and forecasting*. Wiley.

4. NASA Earth Observatory. (n.d.). *Climate change indicators*. Earthdata. Retrieved October 24, 2024, from <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/climate-indicators>

**Лагун Ілона, Лагун Ярослав, Стахів Роман**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**

## **ПЛАТФОРМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ: ВІД ЗБОРУ ДАНИХ ДО ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ**

Розвиток доступних мікроконтролерів та хмарних обчислень став підґрунтям для переходу від громіздких стаціонарних постів до гнучких IoT-мереж. Глобальні проекти, такі як Sensor.community, дозволили масово розгортати станції моніторингу, а впровадження енергоефективних технологій LoRaWAN та NB-IoT забезпечило роками автономну роботу пристроїв. Використання сучасних лазерних та електрохімічних сенсорів стало стандартом завдяки оптимальному поєднанню ціни та точності вимірювань. Саме на цій базі стала можливою реалізація щільних мереж недорогих вузлів Інтернету речей (IoT) шляхом широкомасштабного розгортання пристроїв з обмеженими ресурсами, які у сукупності забезпечують автоматизацію та збір даних. Такі мережі, що переважно використовують технології низькоенергетичних широкосмугових мереж (LPWAN), мають вирішальне значення для моніторингу навколишнього середовища. Однак дані, які вони генерують, часто мають низьку точність через схильність дешевих давачів до «дрейфу» показників та чутливості до вологості. Тому сьогодні все частіше застосовують комбінований підхід: поєднання

стаціонарних еталонних постів із IoT-мережами, які заповнюють «сліпі зони» та дозволяють здійснювати крос-валідацію показників сусідніх вузлів. Висока щільність розгортання IoT-вузлів дозволяє досягти високої якості локального моніторингу та підвищення достовірності даних, проте масштабування таких рішень вимагає уніфікації платформ для забезпечення енергоефективності та функціональної стійкості мережі [1].

Формування платформи екологічного моніторингу – це процес побудови багаторівневої екосистеми, де кожен етап впливає на достовірність кінцевих даних. Для завдань екології критично важливо забезпечити не просто збір цифр, а створення довіреного ланцюжка даних. Для побудови платформ екологічного моніторингу, що здатні обробляти дані з тисяч еко-сенсорів одночасно, використовують архітектуру, яка мінімізує навантаження на центральний сервер та ізолює помилки. Така архітектура включає чотири основні рівні: рівень сприйняття (Perception Layer), рівень зв'язку (Connectivity Layer), рівень даних (Data Layer) та інтелектуальний рівень (Intellectual Layer), у який з часом трансформувався прикладний рівень (Application Layer) завдяки інтенсивному використанню інструментів штучного інтелекту для завдань аналітики та прогнозування.

Рівень сприйняття – це рівень вузлів моніторингу, який формує «фізичний зір» усієї системи моніторингу. Основними вимогами до вузлів моніторингу є модульність конструкції, реалізація механізму Over-the-Air (OTA), використання спеціалізованих мікроконтролерів для задач первинного аналізу на місці.

Рівень зв'язку визначає вибір протоколу передачі даних залежно від топології місцевості моніторингу. Для лісових масивів або агросектору, які є великими територіями, переважно використовують протокол LoRaWAN або Sigfox, а для міської забудови з високою проникною здатністю сигналу – NB-IoT/5G.

Рівень даних об'єднує локальну обробку (Edge) для швидкого реагування та хмарну – для глибокої аналітики. Для забезпечення гнучкості та стійкості до високих навантажень на цьому рівні впроваджується мікросервісна архітектура, яка дозволяє здійснювати горизонтальне масштабування окремих компонентів системи (від обробників вхідних потоків до модулів складної аналітики) незалежно один від одного. Для екологічного моніторингу, де пристрої часто працюють в екстремальних умовах та мають обмежені ресурси критично важливою є фільтрація «шуму» безпосередньо на IoT-пристрої. Така фільтрація перетворює «сірі» дані на інформацію ще до моменту передачі. Це дозволяє зробити систему стійкою, дешевою в експлуатації та здатною до масштабування на тисячі вузлів. Оскільки екологічні дані – це часові ряди, то для ефективного збереження та швидкого пошуку використовують спеціалізовані бази, як-от InfluxDB або TimescaleDB. На відміну від реляційних баз даних, вони оптимізовані для швидкого запису тисяч показників у секунду та ефективного виконання запитів за часовими діапазонами. Як центральні вузли обміну даними використовуються MQTT-брокери. Використання MQTT у задачах екологічного моніторингу дозволяє побудувати реактивну систему, яка працює в реальному часі, економить заряд батареї польових пристроїв та гарантує цілісність даних навіть у суворих умовах експлуатації.

Інтелектуальний рівень – це рівень, де дані стають інструментом для прийняття рішень. На цьому рівні використовують математичні моделі, які виконують дві основні функції: перетворення сирих значень концентрації у зрозумілі індекси та прогнозування стану середовища на основі ретроспективних даних. Основними підходами є визначення інтегрального показника якості повітря (AQI), використання регресійних моделей та статистичного аналізу для виявлення залежностей між екологічними показниками та зовнішніми чинниками (температура, вологість, інтенсивність трафіку), прогнозування на основі нейронних мереж, зокрема використання моделей глибокого навчання (Deep Learning) та інтелектуальна корекція даних. Оскільки недорогі IoT-сенсори можуть мати похибку залежно від метеоумов, на інтелектуальному рівні застосовуються моделі динамічного калібрування. Вони використовують методи машинного навчання для автоматичного коригування значень сенсорів у реальному часі на основі даних з еталонних станцій моніторингу. Крім того на інтелектуальному рівні забезпечується обов'язкова інтеграція з ГІС для побудови динамічних

карт розповсюдження забруднювачів, доступ зовнішніх розробників або громадських організацій через REST або GraphQL API до даних екологічного моніторингу та реалізація системи сповіщень для миттєвого інформування відповідальних служб.

Формування інтелектуальної системи підтримки рішень (ІСПР) це фінальний етап архітектури платформи екологічного моніторингу, де накопичені дані трансформуються у конкретні рекомендації для управлінців (муніципалітетів, екологів, керівників підприємств). Процес формування такої системи базується на інтеграції трьох основних елементів: бази знань, бази моделей та механізму логічного виведення при забезпеченні послідовності «дані → інформація → знання → рішення». Формування ІСПР перетворює платформу моніторингу з інформаційної на управлінську. Це інтелектуальна надбудова, яка мінімізує вплив людського фактора, прискорює реакцію на екологічні інциденти та дозволяє здійснювати превентивне управління середовищем моніторингу [3].

Також варто окремо виділити вертикальну наскрізну безпеку платформ екологічного моніторингу. Оскільки екологічні дані можуть впливати на репутацію окремих підприємств або усього міста, важливо зазначити, що безпека (шифрування TLS, аутентифікація пристроїв) повинна забезпечуватись на всіх чотирьох архітектурних рівнях одночасно.

Таким чином, еволюція платформ екологічного моніторингу від простого збору даних до формування інтелектуальних систем підтримки рішень дозволяє вийти за межі пасивної фіксації показників і перейти до моделі превентивного управління середовищем. Це створює надійний технологічний фундамент, де кожен байт інформації з IoT-сенсорів трансформується у обґрунтовану стратегію забезпечення екологічної безпеки в реальному часі.

1. Algarni, S., & El-Samie, F. E. A. (2025). Energy-efficient distributed edge computing to assist dense Internet of Things. *Future Internet*, 17(1), 37. <https://doi.org/10.3390/fi17010037>

2. Ali, R., Hussain, A., Nazir, S., Khan, S., & Khan, H. U. (2023). Intelligent decision support systems – An analysis of machine learning and multicriteria decision-making methods. *Applied Sciences*, 13(22), 12426. <https://doi.org/10.3390/app132212426>

3. Calvo, I., Espin, A., Gil-García, J. M., Fernández Bustamante, P., Barambones, O., & Apiñaniz, E. (2022). Scalable IoT architecture for monitoring IEQ conditions in public and private buildings. *Energies*, 15(6), 2270. <https://doi.org/10.3390/en15062270>

**Лисяк Наталія, Самотій Наталія**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**

## **ГЕОДИЗАЙН ТА ПРОСТОРОВІ ДАНІ ЯК ІНСТРУМЕНТИ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ**

Прискорення цифрової трансформації та постійно зростаючий потік просторових даних кардинально змінюють підходи до моніторингу довкілля та управління територіями. Традиційні геоінформаційні системи поступово поступаються місцем інтегрованим платформам, що поєднують аналітику реального часу, імітаційне моделювання та інтерактивну візуалізацію. У цьому контексті методологія Geodesign постає як перспективний інструмент, здатний синтезувати просторовий аналіз, екологічне планування та залучення стейкхолдерів до прийняття рішень.

Мета роботи – охарактеризувати методологію Geodesign як інноваційний підхід до просторового планування та моніторингу довкілля, визначити її переваги порівняно з класичними ГІС і обґрунтувати потенціал використання для вирішення екологічних задач у міських та сільських територіях.

Постійний потік просторових даних розширює межі традиційних ГІС, стимулюючи перехід до нової парадигми – data-driven GIS – орієнтованої на підвищення гнучкості, масштабу

і точності просторового аналізу [3]. Це відкриває нові можливості для вивчення складних територіальних проблем у ширшому соціо-просторовому контексті. Методологія Geodesign інтегрує просторове планування, геоінформаційні технології, цифрову візуалізацію та участь зацікавлених сторін у єдиний ітеративний процес проектування територій [1]. Проектування передбачає як адаптацію до навколишнього середовища, так і його свідоме перетворення. На відміну від класичних ГІС, Geodesign передбачає синтез аналітики та дизайну зі зворотним зв'язком між моделлю, користувачами та середовищем, що дозволяє інтерактивно оцінювати наслідки різних сценаріїв розвитку [2]. Технічну основу підходу складають ГІС-платформи з підтримкою імерсивної та розширеної реальності – GeoPlanner і CommunityViz. Якщо класичні ГІС слугували головним чином для аналізу просторових даних і підтримки прийняття рішень у лінійній логіці (збір → аналіз → висновки), то Geodesign реалізує ітеративний цикл: моделювання → оцінка → адаптація. Роль користувача трансформується від споживача інформації до активного учасника дизайн-процесу, а участь зацікавлених сторін інтегрується в усі його етапи (рис. 1).

Практичні кейси показують, що у Шанхаї аналіз просторово-часових структур транспортних викидів на основі близько одного мільярда записів про переміщення пасажирів дозволив розробити рекомендації щодо низьковуглецевої транспортної інфраструктури. У Лондоні аналіз даних смарт-карток Oyster використовується для виявлення збоїв у транспортних системах та оцінки пасажиропотоків у режимі реального часу. Обидва кейси демонструють екологічний потенціал великих просторових даних у поєднанні з імерсивними інструментами аналізу.

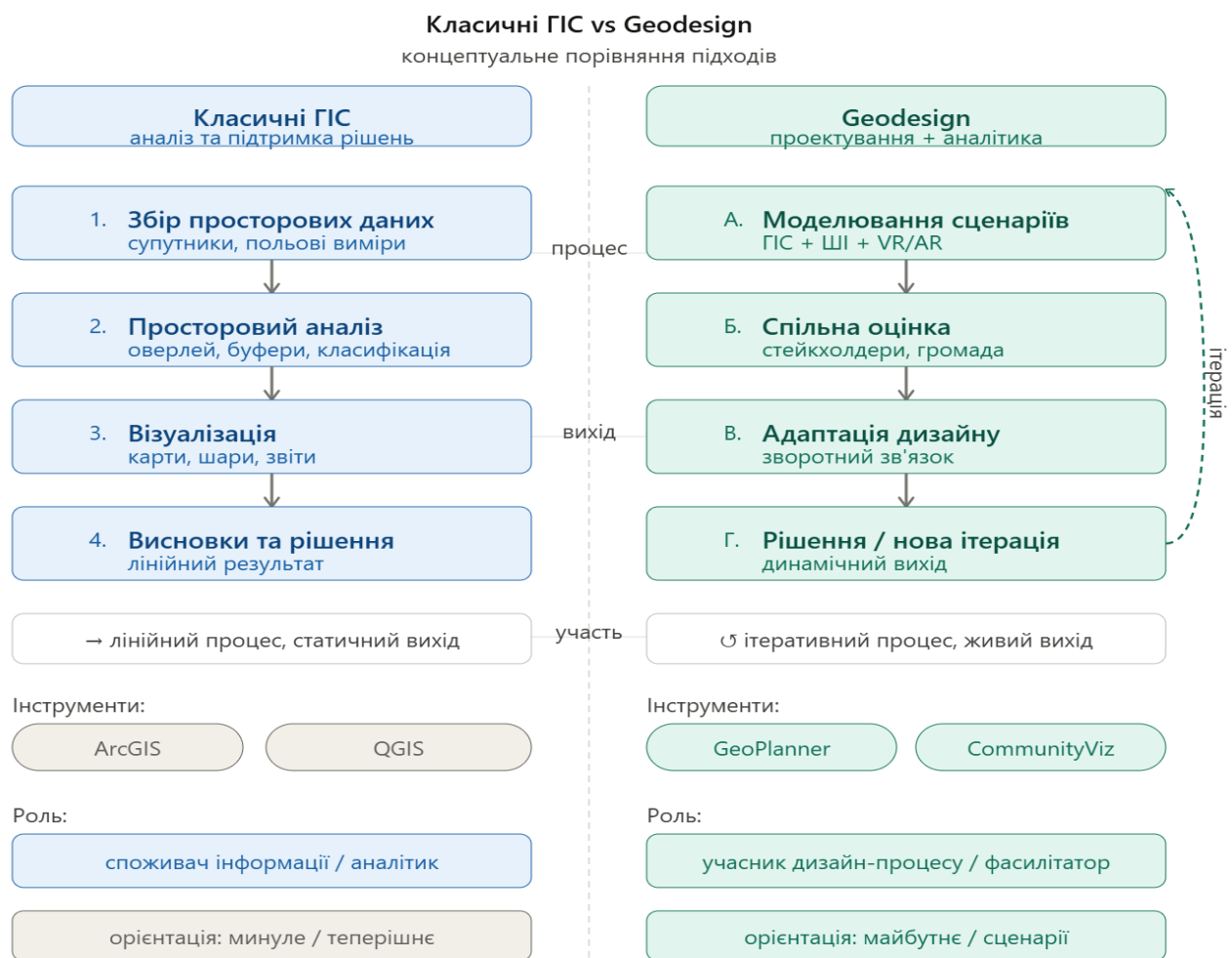


Рис. 1. Порівняльна схема класичних ГІС та методології Geodesign: логіка процесу, роль користувача, інструменти та часова орієнтація.

Джерело: складено авторами

Отже, геодизайн як методологія, що інтегрує імерсивну візуалізацію, геоінформаційний аналіз та сценарне моделювання, є перспективним інструментом екологічного моніторингу та сталого просторового розвитку. Перехід від лінійної логіки класичних ГІС до ітеративного аналітико-дизайнерського процесу підвищує ефективність прийняття рішень щодо охорони довкілля. Подальші дослідження мають бути спрямовані на адаптацію підходу до умов українських міських та сільських територій з урахуванням екологічних наслідків воєнних дій.

1. Ervin, S. (2011). A system for geodesign. In E. Buhmann et al. (Eds.), *Digital Landscape Architecture* (pp. 145–154). Wichmann Verlag.
2. European Commission. (2020). *A long-term vision for the EU's rural areas – Towards stronger, connected, resilient and prosperous rural areas by 2040*. <https://ec.europa.eu>
3. Goos, M., Manning, A., & Salomons, A. (2014). Explaining job polarization: Routine-biased technological change and offshoring. *American Economic Review*, 104(8), 2509–2526. <https://doi.org/10.1257/aer.104.8.2509>
4. Kitchin, R. (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 79(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10708-013-9516-8>
5. Miller, H. J., & Goodchild, M. F. (2015). Data-driven geography. *GeoJournal*, 80(4), 449–461. <https://doi.org/10.1007/s10708-014-9602-6>
6. Steinitz, C. (2012). *A framework for geodesign: Changing geography by design*. ESRI Press.

**Luchak Ivan**  
**Vasyl Stefanyk Carpathian National University**  
**Semak Uliana**  
**Vasyl Stefanyk Carpathian National University**

## **REMOTE SENSING APPROACHES FOR MONITORING NATURALLY REGENERATED FORESTS IN AGRICULTURAL LANDSCAPES**

Naturally regenerated forests developing on former agricultural land constitute a distinct type of secondary woody vegetation that emerges without intentional afforestation. In Ukraine, the expansion of such ecosystems is closely linked to long-term socio-economic transformations, including the withdrawal of agricultural land from active use, demographic decline in rural areas, and restructuring of land management systems. These processes are particularly pronounced across Eastern Europe, where agrarian restructuring following the socio-economic transitions of the 1990s has facilitated widespread natural forest regrowth [1]. At the same time, studies in the Ukrainian Carpathians indicate that forest expansion on abandoned lands has occurred alongside the degradation of old-growth forests due to logging, reflecting the complexity of regional forest dynamics [2].

These forests contribute significantly to ecosystem functioning by supporting carbon accumulation, enhancing habitat diversity, improving landscape connectivity, and stabilizing soil and hydrological processes. Within fragmented agricultural matrices, they frequently act as structural landscape elements that facilitate species dispersal and ecological interactions. Therefore, their systematic assessment is increasingly relevant for climate-related reporting, land-use governance, and the implementation of post-conflict ecological recovery strategies in Ukraine.

This study aims to assess the applicability and performance of contemporary remote sensing methods for identifying, mapping, and tracking naturally regenerated forests in agricultural landscapes, with a focus on their suitability for consistent large-scale monitoring and systematic long-term observation.

The identification of these ecosystems using remote sensing data remains methodologically challenging. Early successional stages often exhibit spectral characteristics similar to those of herbaceous vegetation, making differentiation difficult. In addition, seasonal fluctuations in vegetation

signals, high spatial heterogeneity, and the fragmented nature of secondary forest patches complicate classification procedures. The absence of harmonized definitions and the limited availability of high-quality reference datasets further constrain model development. These factors necessitate the use of integrative approaches combining multiple data sources and temporal observations.

Satellite-based observations, particularly long-term image archives from Landsat and high-resolution data from Sentinel-2, provide a valuable basis for analyzing vegetation dynamics. Multi-temporal analysis enables the detection of gradual transitions from herbaceous to woody vegetation, allowing the identification of abandoned agricultural areas undergoing natural succession. Algorithms designed for continuous land cover change detection have proven effective in capturing these gradual transformations over extended periods [3]. Additionally, vegetation indices such as NDVI and EVI, when analyzed across time series, improve the discrimination of early forest development stages from agricultural land and grass-dominated systems [4, 5].

The combined use of optical and radar data further enhances classification robustness. Sentinel-1 SAR data, sensitive to vegetation structure rather than spectral reflectance, enable consistent observations irrespective of cloud cover and illumination conditions. This multi-sensor integration approach has demonstrated strong performance in identifying abandoned land and early-stage forest regeneration in European landscapes [6].

At finer spatial scales, high-resolution satellite imagery and UAV-based surveys enable detailed analysis of vegetation structure and spatial patterns. These datasets are particularly useful for detecting small, fragmented patches of post-agricultural vegetation that may be overlooked in medium-resolution imagery. Empirical evidence suggests that increasing spatial resolution improves both classification accuracy and the delineation of heterogeneous land cover features [7].

LiDAR technology provides additional insights by capturing vertical forest structure, including canopy height, layering, and biomass distribution. These parameters are essential for quantifying carbon stocks and assessing ecosystem development. As such, LiDAR has become a fundamental tool in forest remote sensing applications related to biomass estimation and structural analysis [8].

Cloud-based geospatial platforms, such as Google Earth Engine, significantly expand analytical capabilities by enabling the processing of large datasets and the automation of classification workflows [9]. In this framework, machine learning techniques – including ensemble methods such as Random Forest [10] and Gradient Boosting [11], as well as deep learning models, have proven highly effective for land cover classification and segmentation of complex landscape patterns [12].

As a pilot case, satellite-based mapping of naturally regenerated forests was conducted for Ivano-Frankivsk Region, demonstrating the feasibility of the proposed approach for regional-scale monitoring in western Ukraine. In conclusion, remote sensing technologies provide a robust methodological foundation for the systematic monitoring of naturally regenerated forests in Ukraine. Their integration with geographic information systems, cloud computing, and advanced machine learning approaches lays the groundwork for the development of national-scale monitoring systems. Such systems are essential for improving land-use governance, supporting climate reporting under international frameworks, and advancing post-conflict ecological restoration efforts across Ukraine.

1. Prishchepov, A. V., Radeloff, V. C., Baumann, M., Kuemmerle, T., & Müller, D. (2012). Effects of institutional changes on land use: Agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe. *Environmental Research Letters*, 7(2), 024021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024021>

2. Kuemmerle, T., Chaskovskyy, O., Knorn, J., Radeloff, V. C., Kruhlov, I., Keeton, W. S., & Hostert, P. (2009). Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007. *Remote Sensing of Environment*, 113(6), 1194–1207. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.006>

3. Zhu, Z., & Woodcock, C. E. (2014). Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 144, 152–171. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>

4. Kolečka, N., Kozak, J., Kaim, D., Dobosz, M., Ginzler, C., Psomas, A., & Price, B. (2021). Greening trends and their relationship with agricultural land abandonment across Poland. *Remote Sensing of Environment*, 257, 112340. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112340>
5. Liu, B., Tian, F., Zhang, X., Li, X., & Wu, B. (2023). Mapping abandoned cropland using within-year Sentinel-2 time series. *Catena*, 223, 106941. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106941>
6. Goga, T., Feranec, J., Bucha, T., Rusnák, M., Sačkov, I., Barka, I., Kopecká, M., Papčo, J., & Otáhel, J. (2020). Abandoned agricultural land identification using object-based approach and Sentinel data in the Danubian Lowland, Slovakia. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2020, 1539–1546. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1539-2020>
7. Morell-Monzó, S., Estornell, J., & Sebastiá-Frasquet, M.-T. (2020). Comparison of Sentinel-2 and high-resolution imagery for mapping abandoned agricultural plots. *Remote Sensing*, 12(12), 2062. <https://doi.org/10.3390/rs12122062>
8. Borsah, A. A., Dadzie, I., & Baffoe, P. E. (2023). LiDAR-based forest biomass remote sensing: A review of metrics, methods and assessment criteria for the selection of allometric equations. *Forests*, 14(10), 2095. <https://doi.org/10.3390/f14102095>
9. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
10. Sun, J., Di, L., Sun, Z., Shen, Y., & Lai, Z. (2023). Optimal parameters of random forest for land cover classification using Sentinel-2 data. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1188093. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1188093>
11. Tamás, J., Louis, A., Fehér, Z. Z., & Nagy, A. (2025). Land cover mapping using high-resolution satellite imagery: A comparison of Random Forest, Gradient Tree Boosting, and Naive Bayes. *Remote Sensing*, 17(15), 2591. <https://doi.org/10.3390/rs17152591>
12. Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A. (2019). Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015>

**Мельник Богдан, Муравель Володимир**  
**Львівський національний університет імені Івана Франка**

## **ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВЕЛИКИХ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ПІДСИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ У МЕЖАХ КОНЦЕПЦІЇ РОЗУМНОГО МІСТА**

Стрімка урбанізація, яка нині є світовою тенденцією, призводить до виникнення і загострення низки екологічних проблем. Однією з таких проблем є забруднення атмосферного повітря у мегаполісах, що суттєво впливає на якість життя їх населення. В розвинутих країнах світу цю проблему намагаються розв'язати у межах концепції “Розумного міста” (Smart City, SC). У стратегічних документах Європейської Комісії SC розглядають як “місце, де традиційні мережі та послуги стають більш ефективними завдяки використанню цифрових рішень на користь мешканців та бізнесу” [1].

Для комплексного оцінювання рівня “інтелектуальності” міста у Віденському технологічному університеті розроблено шестивимірну модель [2], одним із вимірів у якій є вісь – “Розумне середовище” (Smart Environment, SE), яке передбачає привабливість природних умов, відсутність забруднення, стає управління ресурсами та зусилля з охорони навколишнього середовища. Отже, оцінювання якості повітря є важливою складовою процесу визначення відповідності реального міста концепції SC. Підґрунтям для такого оцінювання

сьогодні є відповідна інформаційно-комунікаційна інфраструктура, яка відповідає багаторівневій архітектурі Інтернету речей (IoT Layered Architecture), в якій виділяють п'ять основних рівнів [3]: рівень сприйняття інформації, на якому відбувається збір первинних даних; рівень мережових комунікацій, який забезпечує передавання зібраних даних від осередків їх збору до осередків опрацювання; рівень опрацювання даних, що відповідає за первинну обробку зібраних даних; рівень застосунків, на якому реалізують алгоритми остаточного опрацювання даних, аналіз і представлення отриманих результатів опрацювання; рівень управління, на якому на підставі проведеного аналізу виробляють рекомендації щодо відповідних управлінських рішень.

У цьому дослідженні ставиться завдання визначити перспективи застосування інтелектуальної системи спостереження і прогнозування елементів підсистеми SE в концепції SC, де використовують технологію Великих Даних.

Оцінювання якості повітря у місті передбачає використання автоматизованої системи спостереження за відповідними показниками, а саме: оксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>), озону (O<sub>3</sub>), діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>), дрібнодисперсних часток (PM<sub>2.5</sub>) та грубодисперсних часток (PM<sub>10</sub>). Таке спостереження здійснюють за допомогою пунктів спостереження, які стаціонарно розмішені у різних частинах міста або мобільно пересуваються в його межах. Фізично ці показники, а також інші, наприклад, температура, вологість повітря, напрям і сила вітру тощо, фіксують мультидавачі. Далі зафіксовані дані в єдиному потоці передають з розподілених пунктів спостереження у централізоване сховище даних (Data Warehouse, DW), де відбувається їх агрегація, консолідація і первинний аналіз. Для остаточного опрацювання збережених даних їх необхідно локалізувати і представити у потрібному для середовища опрацювання форматі. Кінцевим етапом роботи системи спостереження є формалізація і представлення результатів опрацювання даних спостереження у тій формі, яка дає змогу оцінити усю картину щодо якості повітря у місті в цілому чи в окремих його частинах. Елементи реалізованої системи моніторингу якості повітря описано в [4].

Для того, щоб на практиці реалізувати концепцію SC, в парадигмі якої вирішують екологічні проблеми, необхідно мати можливість оперувати великою кількістю історичних і поточних даних про повсякденне життя міста. Ці дані щомиті фіксують чи генерують безліч пристроїв, починаючи з спеціалізованих сенсорів, камер відеоспостереження і закінчуючи індивідуальними смартфонами мешканців. Щороку обсяг цих різноманітних даних експоненціально зростає. У великих мегаполісах вже сьогодні цей обсяг щодоби досягає петабайтів. Для якісного опрацювання таких обсягів інформації необхідно застосовувати технології Великих Даних (Big Data, BD).

Сучасна концепція BD опирається на модель 5V [5], а саме:

- Обсяг (Volume), який досягає надвеликих масштабів. Це зумовлює перехід від локальних серверів для зберігання даних до розподілених файлових систем;
- Різноманітність (Variety) даних у сенсі їх змісту (дані з сенсорів спостереження за якістю повітря, відеодані з камер спостереження чи дані з соціальних мереж), структурованості (у вигляді чітко структурованих таблиць, частково структурованих чи неструктурованих повідомлень) і форми представлення (дискретні, аналогові, потокові). Це зумовлює використання об'єктно-орієнтованих СУДБ, для попередньої обробки цих даних;
- Швидкість (Velocity) надходження даних, яке зазвичай відбувається у режимі реального часу. Щоб зберегти їхню актуальність необхідно застосовувати технології потокової обробки даних;
- Достовірність (Veracity) даних, яка забезпечує правильну інтерпретацію реальних подій чи стану. З метою усунення спотворених даних, які з'являються завдяки виходу з ладу пристроїв їх надання, впливу завад чи компрометації зловмисниками, необхідно проводити процедури їх валідації.
- Цінність (Value) даних для прийняття конкретних управлінських рішень. Підвищення цінності забезпечують процедури вибірки тих даних, які передбачені відповідними алгоритмами, і підготовки їх до середовища реалізації цих алгоритмів.

Трансформація даних у концепції BD відбувається на основі підходу до управління, який називається керування даними (Data-Driven). Реалізують цей підхід ґрунтуючись на моделі Дані-Інформація-Знання-Мудрість (Data-Information-Knowledge-Wisdom, DIKW). Саме такий підхід гарантує найбільш якісний варіант підготовки конкретних управлінських рішень.

Усезростаючі обсяги і різноманітність даних створюють значні обчислювальні та інтеграційні труднощі у процесі оцінки певного стану чи процесів у житті міста. Так для оцінки якості повітря як у конкретних локаціях у межах міста, так і у місті в цілому необхідно оперувати не лише даними, що безпосередньо характеризують повітряні маси (типи і концентрації забруднень, температура, вологість, рух тощо), але й даними про чинники, які опосередковано впливають на його якість, наприклад, інтенсивність викидів джерел забруднення, транспортний трафік, ймовірність техногенного впливу тощо. Агрегувати, консолідувати і проаналізувати увесь потрібний масив даних, як це передбачено в концепції DW, все далі стає складніше. Тому переходять до концепції озер даних (Data Lakes, DL). В DL дані зберігається у вихідному форматі, що дозволяє зберігати історію спостережень за роки для подальшого глибокого навчання нейронних мереж. При цьому зберігається можливість не лише відобразити поточну картину, що є задачею моніторингу, але й дати прогноз на підставі аналізу попередніх ситуацій.

Отже, практичне застосування технологій BD докорінно змінює функціонування ключових підсистем SC, зокрема SE. Вони дають змогу перейти від точкового контролю до створення динамічних екологічних карт у реальному часі. Шляхом кореляційного аналізу історичних даних про напрямок вітру, вологість, інтенсивність трафіку та режими роботи промислових підприємств стає можливим будувати високоточні прогностичні моделі поширення забруднюючих речовин. Наприклад, інтелектуальна система, у якій використовують технологію BD здатна передбачити критичне перевищення концентрації дрібнодисперсного пилу за кілька годин до інциденту і автоматично рекомендувати обмеження руху вантажного транспорту в конкретному районі, тим самим запобігаючи екологічній кризі.

Технології BD дають змогу реалізувати перехід від реактивної моделі управління, що базується на реагуванні на вже виниклі проблеми, до проактивної моделі, спрямованої на їх попередження. У контексті побудови підсистеми SE застосування методів та інструментів BD є необхідною умовою для створення ефективної, масштабованої системи екологічного моніторингу, здатної обробляти безперервні потоки даних від тисяч сенсорів у реальному часі та надавати обґрунтовану інформацію для прийняття управлінських рішень, зокрема стосовно підтримки бажаної якості повітря у містах.

1. European Commission. Smart Cities. *European Commission: Cities and Urban Development*. [https://commission.europa.eu/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities\\_en](https://commission.europa.eu/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en).

2. Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H. Kalasek, R., Milanović, N., & Meijers, E. (2007). *Smart cities – Ranking of European medium-sized cities*. Vienna University of Technology. [https://www.researchgate.net/publication/261367640\\_Smart\\_cities\\_-\\_Ranking\\_of\\_European\\_medium-sized\\_cities](https://www.researchgate.net/publication/261367640_Smart_cities_-_Ranking_of_European_medium-sized_cities)

3. Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. 10.1109/COMST.2015.2444095

4. Мельник Б.К., Муравель В.О. (2025). Інтелектуальна система моніторингу забруднення повітря у рамках концепції розумного міста. *Science, technology and global challenges. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference*, 254-260. <https://sciconf.com.ua/iv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-technologyand-global-challenges-4-6-12-2025-tokio-yaponiya-arhiv>

5. Kitchin R. (2014). The real-time city? Big data and smart urbanism. *GeoJournal*, 79, 1–14. 10.1007/s10708-013-9516-8

<sup>1</sup>Мокрий Володимир, <sup>2</sup>Арустамян Едуард, <sup>2</sup>Бондарь Валерія,  
<sup>3</sup>Гордієнко Володимир, <sup>3</sup>Мазепа Василь, <sup>3</sup>Паньковська Галина, <sup>3</sup>Шамро Наталія  
<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка»  
<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів і природокористування України  
<sup>3</sup>Національний природний парк «Північне Поділля»

## БІОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ТЕСТУВАННЯ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ В УМОВАХ НПП «ПІВНІЧНЕ ПОДІЛЛЯ»

Використання біоінформаційних технологій та методів флуоресцентного тестування є сучасним, неінвазивним та експресним підходом для оцінки функціонального стану сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) в умовах Національного природного парку (НПП) «Північне Поділля». Це дозволяє виявляти стресовий стан дерев, спричинений кліматичними змінами або антропогенним навантаженням, ще до появи видимих морфологічних ознак пошкодження. Актуальність моніторингових досліджень стану насаджень сосни звичайної в НПП «Північне Поділля» обумовлена необхідністю оптимізації екосистем, зокрема для збереження рідкісних лучних степів від спонтанного заліснення, при збереженні цінних лісових ділянок парку.

Історія вивчення флори й рослинності північно-західного Поділля (Гологоро-Кременецького кряжу), у тому числі й Вороняків, де розташована основна частина масивів парку, налічує понад 200 років. В чисельних публікаціях висвітлено різні аспекти флористичної та фітоценотичної різноманітності фітобіоти регіону.

Сучасні концепції управління екосистемами ґрунтуються на використанні даних комплексних моніторингових досліджень рослинного покриву, які реалізується на основі кореляційного синтезу біометричних та морфофізіологічних даних. Біопродуктивність дендрофлори лісових насаджень, залежно від конкретики і типу задач, пов'язаних з її вивченням, характеризують лісотаксаційні параметри, а також морфофізіологічні показники – активність фотосинтетичного апарату, вміст пігментів, швидкість газообміну CO<sub>2</sub> або O<sub>2</sub> та ін. На основі фенологічних, анатомо-морфологічних і біофізичних досліджень розробляються показники стійкості рослин до різноманітних стрес-факторів.

Діагностика впливу природних та антропогенних факторів на функціональний стан рослин потребує застосування експресних та інформативних методів. При дослідженні дії на рослину стрес-факторів, особливе місце займає метод фотоіндукції флуоресценції, що широко використовують у сучасних дослідженнях фотосинтетичних процесів. Флуоресцентне тестування лісових екосистем має особливе значення, оскільки флуоресцентні параметри все частіше визнаються не лише діагностичними показниками стресу, але й критичними показниками для кількісної оцінки ефективності фотосинтезу в дослідженнях вуглецевого циклу. Як міра максимальної квантової ефективності фотосистеми 2 (ФС II), параметр  $F_v/F_m$  безпосередньо пов'язаний зі здатністю рослинності перетворювати поглинене світло на хімічну енергію [2], що робить його актуальним для оцінок асиміляції вуглецю, таких як валова первинна продукція GPP (Gross Primary Production) та чистий екосистемний обмін NEE (Net Ecosystem Exchange). В умовах кліматичних змін, флора територій ПЗФ потребує біоінформативних технологій флуоресцентного моніторингу для раннього виявлення стресу, що забезпечує адаптивне управління ресурсами та збалансоване природокористування.

Методологія досліджень передбачає рекогносцирувальні обстеження насаджень і лабораторні вимірювання флуоресцентних параметрів рослин [3]. Відбір зразків листя виконано з нижньої частини крони старовікових дерев та середньої частини крони підросту. Активність фотосинтетичного апарату рослин досліджено методом фотоіндукованої флуоресценції хлорофілу. Кінетику інтенсивності флуоресценції листків виміряно флуорометром «Флоратест». Дані з приладу передаються на комп'ютер, де інтерпретуються програмою «Floratest» в MS Excel для графоаналітичної обробки інформації. Високе часове розділення приладу дозволяє проаналізувати кінетику наростання і спаду інтенсивності флуоресценції досліджуваних об'єктів за числовими характеристиками трьох показників. За числовими

значеннями інтенсивностей фонові, максимальної і стаціонарної флуоресценції розраховуються коефіцієнти кінетики флуоресценції ( $K1$ ,  $K2$ ,  $K3$ ,  $R_{FD}$ ), які характеризують перебіг світлових фаз фотосинтезу й ефективність фотохімічних процесів засвоєння енергії світла. На основі аналізу біофізичного змісту нормованих коефіцієнтів кінетики флуоресценції:  $K1$  – індикаторний показник впливу екзогенних чинників;  $K2$  – коефіцієнт індукції флуоресценції, індикаторний показник квантового виходу флуоресценції,  $K3$  – індикаторний показник ендогенних чинників,  $R_{FD}$  – індекс життєвості, визначено функціональний стан дерев.

Результати є продовженням досліджень [3] фізіологічного стану та адаптивного потенціалу дерев у межах НПП «Північне Поділля», шляхом застосування флуоресцентного тестування і біоінформативного аналізу, для якісної оцінки біопродуктивності лісових екосистем, розроблення науково обґрунтованих рекомендацій з моніторингу та збереження лісових насаджень. Ліси сосни звичайної з домінуванням лишайників, вересу, чорниці займають порівняно незначні площі. На дуже обмеженій ділянці, на південно-західному схилі дюноподібного гребеня між селами Хмільова та Сасів Золочівського р-ну наявний фрагмент соснового деревостану, характерний для дюн Середньої Європи. Також, на території парку представлені фрагменти соснових лісів з домінуванням осоки низької. Зараз вони перебувають на різних стадіях демуаційних сукцесій, оскільки корінні ценози цього типу деградували протягом агрокультурного періоду. Невеликими фрагментами на території парку представлені грабово-дубово-соснові ліси. У Колтівській улоговині представлені угруповання сосново-дубових лісів. Важливим аспектом збалансованого розвитку сучасного суспільства є збереження біологічного та ландшафтного різноманіття. Основним завданням щодо його відтворення є оптимізація структури природно-заповідних територій і об'єктів у відповідності до структури просторових елементів екологічної мережі.

Досліджено культури сосни на території природоохоронного об'єкта «Лиса Гора і Гора Сипуха» з найвищим рівнем видової насиченості на одиницю площі у Східній Європі. Досліджені дерева характеризуються високими значеннями коефіцієнта  $K1 = 87\%$ , який характеризує максимальний квантовий вихід фотосистеми II, що свідчить про їх адаптованість до умов парку. Зафіксоване значення  $K1$  вказує на ефективний фотосинтез та відсутність стресу. Значення індикаторного показника квантового виходу флуоресценції  $K2 = 67\%$  вказує на частку хлорофілів, що беруть участь у фотосинтезі, від загальної їхньої кількості, тобто характеризує високу ефективність світлової фази фотосинтезу. Значення  $K3 = 49\%$  характеризує швидкість флуоресценції, що є ознакою інтенсивного перебігу темнових фотохімічних реакцій та ідентифікує високу життєвість дерев в реальних умовах місцезростання. Розрахований коефіцієнт  $R_{FD} = 2$  використовується як інтегральний показник активності фотосинтетичного апарату дерев. Величина цього показника вказує на високу квантову ефективність фотосинтезу, ідентифікує здорові дерева, що ефективно фотосинтезують.

Подальші дослідження флуоресцентних параметрів рослинності передбачають оперативну оцінку екологічного стану лісів парку та прогнозування їх стійкості.

1. Фіторізноманіття заповідників і національних природних парків України. (2012) Ч.2. *Національні природні парки* / Колектив авторів під ред. В.А. Онищенко і Т.Л. Андрієнко. – Київ: Фітосоціоцентр, 580.

2. Sun D, Wang Q. (2018). Linear relationships between photosynthetic rate and photochemical energy expressed by  $PAR \times Fv/Fm$ . *American Journal of Plant Sciences*. 9(2):125–38. doi: <http://10.4236/ajps.2018.92011> [In English].

3. Петрушка І.М., Мокрий В.І., Арустамян Е.М., Паньковська Г.П., Сомер Г.В. (2025). Кореляційно-регресійний аналіз флуоресценції букових лісів Національного природного парку «Північне Поділля». *Грааль науки : міжнар. наук. журнал*. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», № 58, 297-304. doi <http://10.36074/grail-of-science.14.11.2025>.

## АНАЛІЗ СТАНУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЧИННИКІВ, ЩО НА НЬОГО ВПЛИВАЮТЬ

Проблема якості повітря, яким ми дихаємо існувала завжди, тим більше у сучасному світі, де, за статистикою 2020 року, в Україні на 1000 осіб приходить 245 автомобілів. Ще одна причина забруднення повітря – це заводи, які є майже у кожному районному центрі України, та кількість яких зростає. За період з 2015 по 2019 роки було побудовано 207 нових заводів.

У цій роботі ми спробуємо дослідити це питання, порівнявши вплив різних типів промислових об’єктів на показник AQI (Air Quality Index).

В сучасному світі дана проблема є надзвичайно актуальною, тому над її дослідженням працювало досить багато науковців. Також багато таких статей спрямовані й на дослідження впливу різних очевидних та другорядних забруднювачів повітря. Розглянемо декілька таких робіт.

У [1] більше спрямування на опис системи MoreAir (система моніторингу забруднення повітря в містах). У статті описано методологія при розробці цієї системи. Також, проведено дослідження на основі Марокко, яке показало, що в деяких місцях вихлопи транспорту – це далеко не найбільший забруднювач.

У [2] було завдання створити погодинний прогноз концентрації  $PM_{2.5}$  в повітрі. За основу було взято 2 великих міста в Південній Кореї. За основний алгоритм використовувався LSTM та порівнювався з іншими відомими алгоритмами, де показав себе найкращим чином.

Досить цікава стаття [3], у якій досліджений вплив страйків на якість повітря. Здавалося б, що це абсолютно не очевидний забруднювач, але він є, і досить немалий. Для цього аналізу використанні різні алгоритми машинного навчання, проте найкраще себе показав GBM (gradient boosting machine).

У [4] досліджується залежність між станом повітря та пандемією COVID-19. Тобто, пандемія знизила активність на вулицях, менше транспорту їздило, відповідно – це однозначно мало свій вплив.

На оцінку впливу COVID-19 була спрямована й робота [5]. Зазначається, що під час пандемії спостерігалось явне зниження вмісту шкідливих речовин у повітрі. Проте автор статті запевняє, що немалий вплив на це мали й метеорологічні зміни.

У роботі [6], на основі різних забруднювачів повітря складається прогноз забруднення повітря. Для цього використовуються методи машинного навчання, такі як LSTM, CNN тощо.

Спочатку було зібрано необхідні дані для подальшого дослідження. З ресурсу [10] було взято міста для яких був доступний показник AQI (Air Quality Index). Тоді з різних ресурсів було зібрано інші важливі дані, а саме: координати міст з [www.coordinates\\_converter.com](http://www.coordinates_converter.com) [11], дані про міста, такі як площа, густота та населення міст з Вікіпедії, так як це єдиний ресурс, який дає цю інформацію по всіх потрібних нам населених пунктах, всі виробництва та потенційні забруднювачі у цих містах було взято з ресурсу Google Maps, а також погодні показники з 2 різних ресурсів, а саме [www.meteopost.com](http://www.meteopost.com) [8] та [www.sinoptik.ua](http://www.sinoptik.ua) [9].

Також до цих даних було додано кількість об’єктів знайдених на Google Maps з різними радіусами до міст. Під радіусом мається на увазі різниця площ більшого та меншого кіл з центром в одній точці (рис. 1).

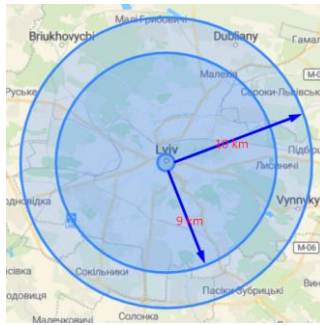


Рис. 1. Візуалізація пошуку об'єктів у частині кола радіусом між 9 км і 10 км

Як вказано в таблиці 1, було виділено 26 типів, по 20 кожного, так як для кожного типу ми брали 20 радіусів (від 1 до 20). Отже отримаємо  $26 \cdot 20 = 520$  колонок. Також перетворимо колонку state за допомогою One-Hot encoding, так як в нашому наборі ця колонка у текстовому форматі.

Підбір гіперпараметрів нейронної мережі буде здійснено методом перебору. Найкраще себе показав наступний набір:

- функція активації – AdaMax;
- оптимізатор – ReLU;
- кількість шарів – 5;
- розмір виходу в першому шарі – 600.

На рис. 2. наведено графік порівняння даного набору параметрів з іншими на прикладі метрики RMSE.

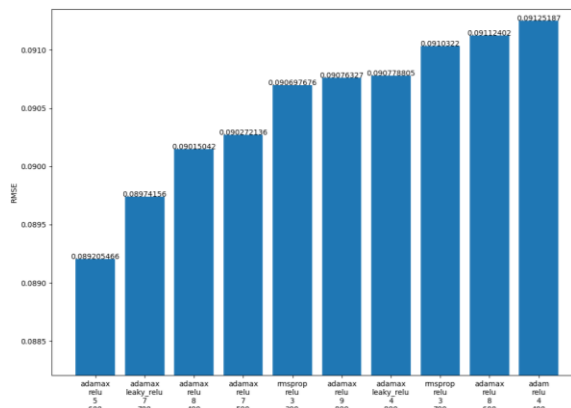


Рис. 2. Стовпчикова діаграма показника RMSE для 10 найкращих дослідів

Для зменшення розмірності набору даних недоцільно застосувати PCA, адже в такому випадку буде неможливо дослідити вплив окремих ознак на AQI. Тому для цього використано алгоритм Permutation Importance. Суть роботи алгоритму полягає в наступних діях: береться натренована модель та набір даних, кожна колонка перемішується певну кількість разів та алгоритм дивиться на те, наскільки змінилася похибка алгоритму. Результат – це коефіцієнт, який позначає вплив кожної колонки на результуючу змінну.

Зменшування розмірності за допомогою вище вказаного алгоритму буде проводитись наступним чином:

- 1) беремо натреновану модель;
- 2) запускаємо роботу алгоритму Permutation Importance;
- 3) видаляємо колонки, які отримали коефіцієнт менше або дорівнює нулю;
- 4) тренуємо модель на новому наборі даних та порівнюємо її похибку з попередньою;
- 5) повторюємо кроки 1-4 доки похибка буде зменшуватися.

На даному етапі розмірність набору даних складає 331042 x 444. На рис. 3 та 4 зображено графіки зменшення розмірності набору даних та зміни похибки.

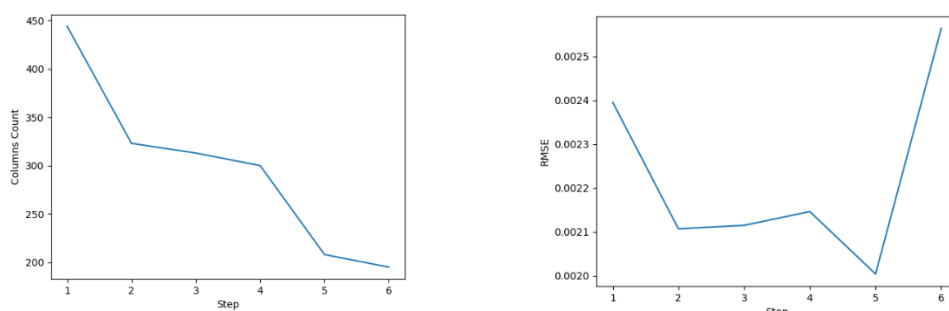


Рис. 3-4. Кількість колонок при поступовому зменшенні розмірності даних та показник RMSE при поступовому зменшенні розмірності даних

Виходячи з графіку на рис. 4, найкращого результату похибки було досягнуто на 5 кроці. На 6 кроці похибка стала різко збільшуватись. При цьому, на 5 кроці кількість ознак обраного набору даних дорівнює 210. Отже, тепер розмірність даного набору даних дорівнює 331042 x 210.

Цей алгоритм кращий за PCA в тому плані, що при зменшенні розмірності покращується сама модель. Проте за цим методом не вийде виконати зменшення розмірності масштабу PCA, адже Permutation Importance – це алгоритм, який працює досить довго.

Далі тренуємо нейронну мережу на основі отриманого набору даних. Нижче наведемо графік тренування (рис. 5).

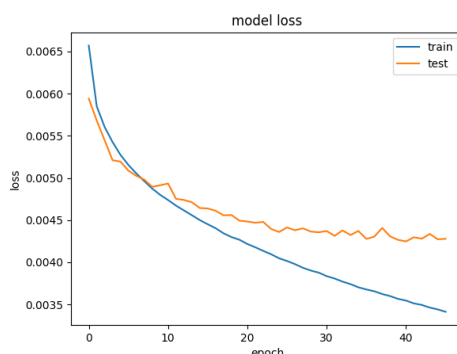


Рис. 5. Графік втрат нейронної мережі

Показник RMSE отриманої моделі вийшов 0.0022528581129933702.

Виведемо 5 найбільших забруднювачів повітря згідно з нашою моделлю. Коефіцієнт впливовості рахується як середній для усіх радіусів одного типу об'єктів.

Таблиця

#### 5 найбільш впливових промислових об'єктів

| Показник                              | Коефіцієнт впливовості |
|---------------------------------------|------------------------|
| Електрична підстанція                 | 0.00013180925648873578 |
| Хімічний завод                        | 0.00013038753893535756 |
| Сонячна фотоелектрична електростанція | 8.770038767039458e-05  |
| Косметична індустрія                  | 8.650569002812188e-05  |
| Виробництво                           | 8.011425893648674e-05  |

Як бачимо, найбільшими забруднювачами є електричні підстанції, які найчастіше будується біля теплових електростанцій. Якщо вірити виданню DW та їхній статті від 25 травня 2021 року [7], то теплові електростанції дійсно є найбільшими забруднювачами повітря в

Україні, що може вказувати на достовірність нашого дослідження. Також пояснити те, що самі електростанції менше впливають на стан якості повітря, можна тим, що їх значно менше на території України, ніж підстанцій

З отриманих даних виходить, що найбільшими забруднювачами після електричних підстанцій є хімічні заводи, що цілком очікуваний результат. Викликає здивування косметична індустрія на четвертому місці, адже це абсолютно не очевидний глобальний забруднювач повітря. На 5 місці об'єкт з досить загальною назвою, просто виробництва, вони можуть виробляти різні товари, проте в загальному всі вони є шкідливими для атмосфери.

Отже, однією з найбільших проблем сучасності є стан якості повітря. У цій роботі вона була досліджена. Для цього був згенерований набір даних на основі різних відкритих джерел, таких як saveecobot, sinoptik, Google Maps, і навіть Вікіпедія. Для останнього ресурсу було аргументовано доцільність використання саме цього ресурсу в даній ситуації. На основі моделі нейронної мережі, гіперпараметри для якої були підібрані методом перебору, та алгоритму Permutation Importance було спочатку зменшено розмірність набору даних з покращенням якості самої моделі, а після чого й визначено найбільші забруднювачі повітря серед промислових об'єктів (електрична підстанція, хімічний завод, сонячна фотоелектрична електростанція).

1. Gryech, I., Ben-Aboud, Y., Guermah, B., Sbihi, N., Ghogho, M., & Kobbane, A. (2020). Moreair: A low-cost urban air pollution monitoring system. *Sensors (Switzerland)*, 20(4). Scopus. <https://doi.org/10.3390/s20040998>

2. Qadeer, K., Rehman, W. U., Sheri, A. M., Park, I., Kim, H. K., & Jeon, M. (2020). A Long Short-Term Memory (LSTM) network for hourly estimation of PM2.5 concentration in two cities of South Korea. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(11). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app10113984>

3. Zalakeviciute, R., Rybarczyk, Y., Alexandrino, K., Bonilla-Bedoya, S., Mejia, D., Bastidas, M., & Diaz, V. (2021). Gradient boosting machine to assess the public protest impact on urban air quality. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(24). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app112412083>

4. Lin, G.-Y., Chen, W.-Y., Chieh, S.-H., & Yang, Y.-T. (2022). Chang impact analysis of level 3 COVID-19 alert on air pollution indicators using artificial neural network. *Ecological Informatics*, 69. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101674>

5. Li, Y., Zhu, Y., Tan, J. Y. K., Teo, H. C., Law, A., Qu, D., & Luo, W. (2022). The impact of COVID-19 on NO2 and PM2.5 levels and their associations with human mobility patterns in Singapore. *Annals of GIS*, 28(4), 515–531. Scopus. <https://doi.org/10.1080/19475683.2022.2121855>

6. Ghufraan Isam Drewil, Dr. R. J. A.-B. (2021). *Forecast Air Pollution in Smart City Using Deep Learning Techniques: A Review* Ghufraan Isam Drewil , Dr. Riyadh Jabbar Al-Bahadili. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4737746>

7. Вугільні ТЕС України забруднюють повітря найбільше в Європі – DW – 25.05.2021. (б. д.). Вилучено 15, Листопад 2023, із <https://www.dw.com/uk/vuhilni-tes-ukrainy-zabrudniuiut-povitria-naibilshe-v-yevropi-doslidzhennia/a-57653232>

8. Метеопост, Р. by. (б. д.). *Метеопост–Архів погоди*. Вилучено 15, Листопад 2023, із <https://meteopost.com/weather/archive/>

9. Погода у Києві. (б. д.). SINOPTIK.UA. Вилучено 15, Листопад 2023, із <https://ua.sinoptik.ua/погода-київ>

10. Якість повітря в Україні онлайн: Карта моніторингу якості повітря - SaveEcoBot. (б. д.). Вилучено 15, Листопад 2023, із <https://www.saveecobot.com/maps>

11. coordinates-converter.com. (б. д.). *Online converter to all coordinate systems | UTM, WGS. | with map*. Online-Umrechner in Alle Gängigen Koordinatensysteme Wie UTM, WGS, WGS84 Und CH1903, Gauss-Krueger Mit Grosser Karte. Вилучено 15, Листопад 2023, із <https://coordinates-converter.com/en/decimal/51.000000,10.000000?karte=OpenStreetMap&zoom=8>

## **ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЯК ІНДИКАТОР ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ (НА ПРИКЛАДІ МІСТА ІВАНО-ФРАНКІВСЬК)**

У роботі досліджено динаміку змін зеленої інфраструктури міста Івано-Франківськ на основі супутникових даних дистанційного зондування Землі. Проведено геоінформаційний аналіз змін площі зелених насаджень за період 2000–2025 рр. Встановлено тенденцію до зменшення частки рослинного покриву, що супроводжується посиленням екологічних ризиків. Обґрунтовано роль зеленої інфраструктури як ключового елемента забезпечення екологічної стабільності урбанізованих екосистем.

Сучасні урбанізаційні процеси супроводжуються інтенсивною трансформацією природних ландшафтів, що проявляється у скороченні площ зелених насаджень та зміні просторової структури міських екосистем. Зростання щільності забудови призводить до порушення екологічної рівноваги, зниження біорізноманіття та погіршення якості довкілля.

Зелена інфраструктура відіграє ключову роль у підтриманні екологічної стабільності міст, виконуючи функції очищення повітря, регуляції мікроклімату та зменшення ефекту «теплового острова». У зв'язку з цим актуальним є дослідження динаміки змін зелених насаджень у межах урбанізованих територій.

Сучасні методи дистанційного зондування Землі (Remote Sensing) та геоінформаційні системи (GIS) дозволяють здійснювати високоточний аналіз змін рослинного покриву у часі та просторі (Wulder et al., 2012).

Метою роботи є оцінка динаміки зеленої інфраструктури міста Івано-Франківськ як індикатора екологічної стабільності урбанізованого середовища.

Дослідження базується на використанні даних дистанційного зондування Землі, зокрема супутникових знімків програм Landsat program та Sentinel-2 mission.

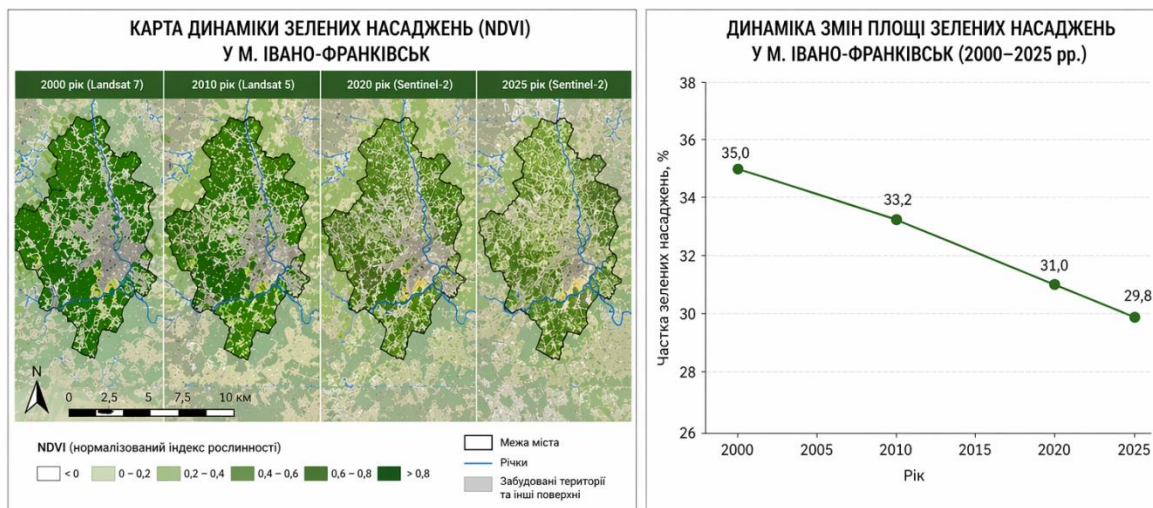
Обробка даних здійснювалася із застосуванням геоінформаційних технологій у середовищах:

- QGIS
- Google Earth Engine

Для оцінки змін рослинного покриву використовували метод класифікації супутникових зображень із виділенням категорії «зелені насадження». Аналіз проводився для часових зрізів: 2000, 2010, 2020 та 2025 роки.

Кількісну оцінку здійснювали шляхом визначення частки площі зелених насаджень у межах міської території. Додатково проводився порівняльний аналіз динаміки змін.

У результаті аналізу встановлено тенденцію до поступового зменшення площі зелених насаджень у межах міста Івано-Франківськ.



ТАБЛИЦЯ 1 – ДИНАМІКА ПЛОЩІ ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ У М. ІВАНО-ФРАНКІВСЬК

| Рік                        | Площа зелених насаджень, га | Частка від площі міста, % | Зміна порівняно з попереднім періодом, % |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------------------|
| 2000                       | 2 042,6                     | 35,0                      | –                                        |
| 2010                       | 1 938,1                     | 33,2                      | –1,8                                     |
| 2020                       | 1 810,0                     | 31,0                      | –2,2                                     |
| 2025                       | 1 738,2                     | 29,8                      | –1,2                                     |
| Загальна зміна (2000–2025) |                             | –5,2 в.п.                 | –5,2                                     |

Рис. 1. Аналіз динаміки змін зелених насаджень міста Івано-Франківськ з використанням супутникових даних.

Загальне скорочення площі зелених насаджень за досліджуваний період становить понад 5 %, що свідчить про інтенсивний вплив урбанізаційних процесів.

Найбільш виражені зміни зафіксовано у периферійних районах міста, де відбувається активна житлова забудова. Водночас центральна частина характеризується стабільно низьким рівнем озеленення.

Зменшення площі зелених насаджень є одним із ключових факторів погіршення екологічного стану міських екосистем. Втрата рослинного покриву призводить до підвищення температури повітря, збільшення концентрації забруднювачів та зниження якості життя населення.

Отримані результати підтверджують тенденції, характерні для більшості урбанізованих територій, де процеси забудови супроводжуються деградацією природних компонентів.

Використання супутникових даних дозволяє здійснювати об'єктивний моніторинг змін та виявляти проблемні зони. Це відкриває можливості для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері міського планування.

Встановлено, що у межах міста Івано-Франківськ відбувається поступове скорочення площі зелених насаджень, що свідчить про зростання антропогенного навантаження.

Зелена інфраструктура є важливим індикатором екологічної стабільності урбанізованих територій, а її зменшення має негативні екологічні наслідки.

Застосування геоінформаційних технологій та дистанційного зондування Землі є ефективним інструментом моніторингу стану міського середовища та може бути рекомендоване для впровадження у систему екологічного управління.

1. Wulder, M. A. et al. (2012). *Remote Sensing of Environment*.
2. Drusch, M. et al. (2012). Sentinel-2 mission.
3. European Environment Agency (2022). Urban green infrastructure.
4. WHO (2021). Air Quality Guidelines.

## **РОЗРОБКА МОДЕЛІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ВІДХОДІВ ЗА ТИПОМ**

**Вступ і постановка задачі.** Важливою екологічною проблемою сьогодення є проблема поводження з відходами. За даними Світового банку, у 2016 році обсяг утворення твердих побутових відходів (ТПВ) у світі становив 2,01 млрд тон на рік, при цьому щонайменше 33% цих відходів не обробляються належним чином, що призводить до значного негативного впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей [1]. Прогнозується, що до 2050 року цей обсяг зросте і досягне 3,40 млрд тон. Також середньодобове утворення відходів на одну особу становить 0.74 кг та коливається від 0.11 до 4.54 кг залежно від рівня доходу та урбанізації. Окрему загрозу становлять пластикові відходи, які у 2016 році складали 12% від загального обсягу ТПВ, тобто 242 млн тон [1]. Неналежне управління відходами призводить до забруднення океанів, засмічення дренажних систем, поширення захворювань, підвищення рівня викидів парникових газів та негативного впливу на економічний розвиток.

В Україні ситуація з твердими побутовими відходами є критичною. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища за 2021 рік зазначає, що загальний обсяг утворених побутових відходів становив 10.1 млн тон. Водночас лише 6.8% цієї кількості було перероблено, тоді як решта захоронюється на полігонах, більшість з яких є переповненою або не відповідає екологічним нормам. Найбільший обсяг відходів зафіксовано в місті Києві – понад 1.5 млн тон. Понад 0.5 млн тон сміття щорічно утворюється також у Дніпропетровській (816.2 тис. тон), Харківській (779.6 тис. тон), Донецькій (702.4 тис. тон), Львівській (618.8 тис. тон), Тернопільській (677.4 тис. тон) та Одеській (520.6 тис. тон) областях [2].

Вищевказане доводить, що автоматизація процесів сортування відходів є важливим процесом. Застосування методів штучного інтелекту дозволяє підвищити ефективність та точність сортування, зменшити витрати часу та людських ресурсів [3,4]. На відміну від традиційних ручних методів, системи на основі комп'ютерного зору здатні швидко обробляти великі обсяги даних та оперативно приймати рішення.

Перспективним та поширеним підходом є використання глибоких згорткових нейронних мереж (CNN) для автоматичної класифікації відходів [3, 4]. Такі моделі розпізнають характерні візуальні ознаки різних типів сміття, наприклад пластику, скла, паперу або органічних залишків. Дослідження [3, 4] показують, що застосування CNN в окремих випадках дозволяє рівня точності класифікації понад 90%.

Також, активно досліджуються можливості застосування методів передавального навчання, що передбачають використання попередньо натренованих моделей для пришвидшення навчання і підвищення точності на обмежених наборах даних [5, 6].

**Метою** даної роботи є дослідження та розробка ефективного підходу до автоматизованого сортування твердих побутових відходів із використанням сучасних методів штучного інтелекту, зокрема згорткових нейронних мереж. У роботі розглянуто існуючі підходи до класифікації, а також створити модель комп'ютерного зору, здатну точно розпізнавати різні типи сміття.

**Використаний набір даних.** Перший набір (CleanData) містить в собі дещо “простіші” дані, тобто більш очевидний набір фото. Другий набір LastDataset більш “складний”, а саме більше різноманітних ракурсів та видів сміття для кожної категорії. Пошук фото був здійснений на сайті Kaggle у вкладці Datasets, тобто всі дані взяті з відкритих джерел [7-9]. Взяті набори даних складаються з різних категорій, тому при утворенні власного набору було проведення групування і виділення основних категорій сміття за типом.

Після групування трьох наборів було виділено такі основні категорії: Cardboard (картон), Glass (скло), Metal (метал), Organic (органіка), Paper (папір), Plastic (пластик).

Набір CleanData: він складається з папок, які містять фото сміття по категоріях, та текстових файлів, які містять назву фото та числове значення, яке відповідає за те, до якої категорії відноситься фото. Це необхідно для встановлення відповідності між фото та категорією сміття до якого це фото відноситься. Для цього набору для класу Organic була проведена очистка фону, щоб наша модель не вивчала ознаки фону як ознаки об'єкта.

Структура LastDataset є ідентичною структурі першого набору даних. Для цього набору даних також була проведена очистка фону для класу Organic, крім цього було проведено очищення нечітких фото. На відміну від першого набору, цей містить в собі більше типів сміття в кожній з категорій, а також більш “неочевидні” ракурси об'єктів. Слід зауважити, що практично у всіх категоріях кількість фото менша порівняно з CleanDataset (табл. 1), це відбулось через видалення фото з повторюваними ракурсами. Таким чином новий набір даних є меншим за кількістю але складнішим за унікальністю типів кожного з класу

Такий набір категорій є достатнім для поставленого завдання, а саме класифікації сміття за його типом. Варто розуміти, що такий набір категорій є неповним, можливе його доповнення додатковими типами сміття або розбиття наявних класів на підкласи, наприклад: текстиль, медичні відходи, розбиття класу “пластик” за типом пластику, тощо.

Таблиця 1. Розподіл класів в наборах даних

| Клас      | CleanDataset | LastDataset |
|-----------|--------------|-------------|
| Cardboard | 403          | 524         |
| Glass     | 501          | 409         |
| Metal     | 410          | 220         |
| Organic   | 411          | 298         |
| Paper     | 594          | 539         |
| Plastic   | 482          | 490         |

**Методи та моделі.** У процесі побудови моделей було створено дві власні мережі, перша – звичайна згорткова нейронна мережа (CustomCNN), та друга – згорткова нейронна мережа Dense типу (CustomDense).

CustomCNN можна класифікувати як послідовну, тобто дані проходять послідовно (лінійно), від одного шару до іншого. Ця модель була розроблена для задачі багатокласової класифікації зображень сміття на шість основних вищезгаданих категорій. Входом моделі є зображення розміром  $128 \times 128$  пікселів з трьома каналами (RGB).

Архітектура моделі побудована за принципом послідовного ускладнення, де кожен наступний блок включає більшу кількість фільтрів та сильнішу регуляризацию. Модель починається з вхідного шару, після чого іде перший блок згорткових операцій: два згорткові шари Conv2D з 32 фільтрами, кожен із ядром  $3 \times 3$ , та функцією активації ReLU. Розглянуті шари зберігають просторову розмірність завдяки параметру padding=same, а за ними йде шар нормалізації, який стабілізує та пришвидшує процес навчання. Далі застосовується підвибірка через MaxPooling2D, що зменшує розміри і шар Dropout, який випадково відключає 25% нейронів, запобігаючи перенавчанню.

Другий блок містить подібну структуру, але кількість фільтрів збільшується до 64, а рівень регуляризації до 50%. Це дозволяє моделі вивчати більш складні патерни у зображеннях, одночасно зменшуючи ризик перенавчання. Третій блок складається з двох шарів Conv2D по 128 фільтрів кожен з нормалізацією та завершальним шаром GlobalAveragePooling2D. Цей шар виконує згортку по всій області, перетворюючи кожен карту ознак у єдине число, що значно зменшує кількість параметрів порівняно з традиційним Flatten, і таким чином знижує ймовірність перенавчання. Після цього також використовується Dropout з імовірністю 0.5.

Після згорткової частини йдуть два повнозв'язні (Dense) шари. Перший з них має 256 нейронів та використовує активацію ReLU, а далі знову застосовується Dropout. Останній шар є

вихідним і містить 6 нейронів (по одному для кожного класу) з функцією активації softmax, що дозволяє моделі видавати ймовірнісні оцінки для кожного з класів.

CustomDense модель як і попередня, спрямована на ідентифікацію шести категорій сміття. Особливістю обраного підходу є використання щільних з'єднань між шарами (dense connections), що дозволяє повторно використовувати раніше вилучені ознаки на глибших рівнях, покращуючи ефективність зворотного поширення помилки та сприяючи кращій генералізації.

Архітектура моделі передбачає вхідний шар із розміром зображення  $200 \times 200 \times 3$ . Початкові ознаки вилучаються за допомогою згорткового шару з ядром  $7 \times 7$  та кількістю фільтрів 32, із подальшою нормалізацією, активацією ReLU та операцією MaxPooling. Далі модель складається з трьох щільних блоків (dense block), кожен з яких включає послідовність згорткових підблоків із нормалізацією, нелінійною активацією та згорткою, після якої результат об'єднується з вхідним тензором. Це забезпечує повне повторне використання ознак та сприяє глибшому навчанню без значного збільшення кількості параметрів.

Після кожного з перших двох щільних блоків застосовується перехідний шар, який зменшує кількість каналів за допомогою згортки  $1 \times 1$  та виконує зниження просторової роздільності через AveragePooling. Третій щільний блок завершує вилучення ознак, після чого застосовується глобальне середнє згортання (GlobalAveragePooling2D), що трансформує тензор у вектор фіксованої довжини. Для зменшення ймовірності перенавчання вводиться шар регуляризації Dropout із ймовірністю активації 0.5. Завершує архітектуру повнозв'язний шар з активацією softmax, який формує ймовірнісний розподіл по класах.

Також, для порівняння ефективності, було взято дві стандартні моделі ResNet50 та DenseNet201. Вони використовувались як основа (екстрактор ознак) у задачі класифікації зображень сміття. Основною метою було адаптувати ці моделі до специфіки власного набору даних шляхом донавчання верхніх шарів, а також здійснити подальше тонке налаштування для покращення результатів.

**Результати та обговорення.** Для оцінки ефективності було використано метрики Accuracy, Recall, F1-Score, Loss, AUC. Також слід зазначити, що перший “простіший” набір CleanData був використаний для тренування всіх моделей. Після цього на основі отриманих даних та їх порівняння було вибрано найкращу модель, та натреновано її на “складнішому” наборі даних. Отримані результати для набору CleanData наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Результати роботи моделей

| Модель      | Метрика   | Cardboard | Glass | Metal | Paper | Plastic | Organic |
|-------------|-----------|-----------|-------|-------|-------|---------|---------|
| CustomCNN   | Precision | 0.97      | 0.62  | 0.97  | 1.00  | 0.98    | 0.44    |
|             | Recall    | 0.85      | 0.77  | 0.28  | 0.99  | 0.52    | 0.91    |
|             | F1-score  | 0.90      | 0.69  | 0.43  | 1.00  | 0.68    | 0.60    |
| ResNet50    | Precision | 0.86      | 0.61  | 0.85  | 1.00  | 0.81    | 0.65    |
|             | Recall    | 0.83      | 0.67  | 0.65  | 1.00  | 0.85    | 0.70    |
|             | F1-score  | 0.85      | 0.64  | 0.74  | 1.00  | 0.83    | 0.68    |
| CustomDense | Precision | 0.95      | 0.90  | 0.85  | 0.99  | 0.88    | 0.89    |
|             | Recall    | 0.94      | 0.82  | 0.91  | 1.00  | 0.95    | 0.82    |
|             | F1-score  | 0.94      | 0.86  | 0.88  | 0.99  | 0.91    | 0.86    |
| DenseNet201 | Precision | 0.94      | 0.77  | 0.97  | 1.00  | 0.90    | 0.88    |
|             | Recall    | 0.94      | 0.96  | 0.70  | 0.99  | 0.96    | 0.80    |
|             | F1-score  | 0.94      | 0.86  | 0.81  | 0.99  | 0.93    | 0.84    |

Результати аналізу CustomCNN свідчать про недостатню точність моделі – загальна точність склала лише 71%, при високому значенні втрат (Loss = 0.7) та низькому AUC = 0.6.. Це

свідчить про те, що проста згорткова архітектура не здатна ефективно виділяти складні ознаки об'єктів сміття.

ResNet50 показала кращу загальну точність – 78%, а також суттєве зростання Recall для класу Organic, однак в інших класах точність знизилася або залишилась на попередньому рівні. Модель дещо краще виділяє особливості об'єктів, проте зазнає труднощів з подібними за зовнішнім виглядом класами.

CustomDense показала значне зростання всіх метрик: Loss = 0.23, AUC = 0.95 і загальну точність на високому рівні. Модель демонструє гарну збалансованість між Precision та Recall для кожного класу, зокрема для складних класів Glass та Organic.

Найкращі результати були отримані моделлю DenseNet201, яка досягла найвищих значень Precision, Recall та F1-score майже для всіх класів. Зокрема, вона дуже точно розпізнавала клас Glass, який був проблемним для інших моделей. Єдиними суттєвими помилками були змішування класів Paper та Cardboard, що є логічним через їх візуальну подібність. Загалом, DenseNet201 показала найвищу якість класифікації серед усіх протестованих моделей.

Окрім точності, було також проаналізовано додаткові важливі показники: час навчання, швидкість розпізнавання та обсяг пам'яті моделей. Найефективнішою в цьому аспекті виявилася модель CustomDense адже вона має найшвидший час навчання (~100 сек/епоха), займає малий обсяг пам'яті (6.07 МБ) і має найвищу швидкість розпізнавання (0.0328 сек). У той час як DenseNet201, хоча і демонструє найвищу точність, потребує в чотири рази більше часу на тренування і більше пам'яті.

Таким чином, за результатами дослідження можна зробити висновок, що DenseNet201 є оптимальним вибором для подальшого використання, оскільки забезпечує найкращу точність. У той же час, розроблена CustomDense варто розглядати як альтернативу в завданнях, де важливий баланс між точністю, швидкістю роботи та ресурсоефективністю.

1. Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

2. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2023). *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році*. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>

3. Chaudhary, P. S., Godbole, S. R., & Soman, R. D. (2017). *Application of machine learning to waste management: Identification and classification of recyclables*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26805.50406>

4. Larbi, G., Aridj, G. A., & Saher, L. (2022). *CNN-based plastic waste detection system*. BOHR International Journal of Smart Computing and Information Technology, 3(1), 43–49. <https://doi.org/10.54646/bijscit.2022.26>

5. Poudel, S., & Poudyal, P. (2022). *Classification of waste materials using CNN based on transfer learning*. In Proceedings of the Forum for Information Retrieval Evaluation (FIRE '22) (pp. 1–5). ACM. <https://doi.org/10.1145/3574318.3574345>

6. cchangcs. (n.d.). *Garbage classification* [Data set]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/asdasdasdasdas/garbage-classification/data>

7. Ozkefe, F. (n.d.). *TrashNet* [Data set]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/feyzazkefe/trashnet>

8. Arvidsson, J. (n.d.). *RealWaste image classification* [Data set]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/joebeachcapital/realwaste>

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРАВ ЛЮДИНИ**

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується стрімкою цифровізацією усіх сфер державного управління, включаючи сферу охорони довкілля. Інформаційні технології перетворюються на ключовий інструмент забезпечення екологічної безпеки, моніторингу стану навколишнього природного середовища та реалізації екологічних прав людини. Особливої актуальності ці питання набувають в умовах воєнних дій, техногенних загроз і глобальних кліматичних змін.

Право людини на безпечне для життя і здоров'я довкілля належить до фундаментальних конституційних прав. Відповідно до статті 50 Конституції України кожному гарантується право на безпечне довкілля та на вільний доступ до інформації про його стан [1]. Таким чином, екологічна безпека безпосередньо пов'язується з інформаційною відкритістю, що обумовлює необхідність використання сучасних інформаційних систем для збору, обробки та поширення екологічної інформації.

Важливе значення у цій сфері має Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», який закріплює право громадян на екологічну інформацію, участь у прийнятті рішень та відшкодування шкоди, заподіяної порушенням екологічного законодавства [3]. Реалізація цих прав у сучасних умовах неможлива без цифрових інструментів, зокрема відкритих державних реєстрів, електронних систем моніторингу та геоінформаційних платформ.

Закон України «Про інформацію» визначає екологічну інформацію як інформацію про стан довкілля, джерела його забруднення, заходи щодо охорони природного середовища та стан здоров'я населення, пов'язаний із впливом екологічних факторів [4]. Водночас Закон України «Про доступ до публічної інформації» встановлює обов'язок органів влади забезпечувати відкритість інформації, що становить суспільний інтерес, зокрема екологічної [5]. Саме інформаційні технології забезпечують оперативність доступу до таких даних через офіційні веб-портали, відкриті бази даних та електронні сервіси. Міжнародно-правовим стандартом у сфері екологічної демократії є Орхуська конвенція 1998 року, яка закріплює три взаємопов'язані складові екологічних прав: доступ до інформації, участь громадськості у прийнятті рішень та доступ до правосуддя [2]. Конвенція передбачає обов'язок держав активно поширювати екологічну інформацію, у тому числі з використанням електронних баз даних і сучасних засобів зв'язку, що підкреслює роль інформаційних технологій як ключового механізму реалізації екологічних прав.

На рівні Європейського Союзу доступ до екологічної інформації регулюється Директивою 2003/4/ЕС, яка зобов'язує держави забезпечувати доступ громадськості до екологічних даних у максимально широкому обсязі, включаючи електронні формати [8]. Крім того, Європейський кліматичний закон 2021 року визначає цифрові інструменти як важливий елемент реалізації політики досягнення кліматичної нейтральності [9].

Особливу роль інформаційні технології відіграють у системі екологічного моніторингу. Сучасні системи дистанційного зондування Землі, супутникові технології, безпілотні літальні апарати, автоматизовані датчики контролю якості повітря та води дозволяють отримувати об'єктивні дані про стан довкілля в режимі реального часу. Геоінформаційні системи забезпечують інтеграцію та візуалізацію таких даних, що значно підвищує ефективність управлінських рішень у сфері природокористування.

В умовах війни інформаційні технології стають незамінним інструментом документування шкоди довкіллю, завданої бойовими діями. Супутникові знімки, цифрові карти, системи дистанційного моніторингу дозволяють фіксувати факти руйнування природних

екосистем, забруднення водних ресурсів і ґрунтів, пожеж та інших екологічних катастроф навіть на тимчасово окупованих територіях. Такі дані можуть використовуватися як докази у міжнародних судових інституціях.

Крім того, цифровізація сприяє прозорості діяльності органів державної влади у сфері природоохоронної політики, що відповідає принципам демократичного врядування та підвищує рівень довіри суспільства. Відкриті екологічні дані дозволяють громадськості здійснювати громадський контроль за діяльністю суб'єктів господарювання та органів влади, а також брати участь у прийнятті екологічно значущих рішень.

Водночас розвиток інформаційних технологій породжує нові виклики, пов'язані із захистом інформації, кібербезпекою екологічних систем та достовірністю даних. Закон України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» визначає необхідність захисту інформаційних ресурсів держави, що має особливе значення для систем екологічного моніторингу та управління критично важливою інфраструктурою [7].

Отже, інформаційні технології виступають не лише технічним інструментом збору та обробки екологічних даних, але й важливим правовим механізмом забезпечення екологічної безпеки та реалізації екологічних прав людини. Подальший розвиток цифрових екологічних систем має здійснюватися з урахуванням міжнародних стандартів доступу до інформації, принципів відкритості, прозорості та захисту прав людини.

1. Конституція України: Закон України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>

2. Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля (Орхуська конвенція) від 25.06.1998. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_015](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015)

3. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>

4. Про інформацію: Закон України від 02.10.1992 № 2657-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2657-12>

5. Про доступ до публічної інформації: Закон України від 13.01.2011 № 2939-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2939-17>

6. Про національну безпеку України: Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19>

7. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України: Закон України від 05.10.2017 № 2163-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19>

8. Directive 2003/4/EC of the European Parliament and of the Council of 28 January 2003 on public access to environmental information. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32003L0004>

9. Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality (European Climate Law). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>

**Сабадаш Олег, Черепанин Роман**  
*Карпатський національний університет імені Василя Стефаника*

## **ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ SMART ДЛЯ МОНІТОРИНГУ БІОРІЗНОМАНІТТА ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАУКОВОЇ РОБОТИ ПРИРОДООХОРОННИХ УСТАНОВ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ**

Збереження біорізноманіття в умовах зростаючого антропогенного тиску та кліматичних змін потребує від природоохоронних установ Карпатського регіону впровадження принципово

нових методів збору та аналізу даних. Традиційні методи польового моніторингу, що базуються на паперових носіях, дедалі частіше демонструють свою неефективність через низьку оперативність, високу ймовірність суб'єктивних помилок та складність подальшої систематизації великих масивів інформації. У цьому контексті цифровізація наукової діяльності, зокрема впровадження спеціалізованих мобільних додатків, стає не просто технічним оновленням, а необхідною умовою для підвищення управлінської ефективності територій природно-заповідного фонду (ПЗФ) [1].

Питання оцінки ефективності управління заповідними територіями за міжнародними стандартами (METT, PAME, IMET) описані у роботах провідних експертів IUCN та WWF [2, 3]. В Україні перехід на цифрові стандарти моніторингу, зокрема впровадження системи SMART, перебуває на стадії активної інтеграції в державну політику управління ПЗФ. Проте залишається недостатньо вивченим питання синергії професійних систем (SMART) із іншими інструментами моніторингу біорізноманіття та її специфічного застосування саме в умовах гірських екосистем Карпат. Метою статті є обґрунтування ролі мобільних додатків, як важливого елемента сучасної системи моніторингу біорізноманіття та визначення їх ролі у підвищенні ефективності наукової роботи природоохоронних установ Карпатського регіону.

Сучасні цифрові технології суттєво трансформують підходи до моніторингу, замінюючи традиційні методи більш ефективними інструментами збору та обробки інформації. Провідну роль у цьому процесі відіграє система SMART, яка активно впроваджується у діяльність природоохоронних установ і забезпечує стандартизований підхід до збору та аналізу просторових даних [4]. Мобільні платформи, що використовуються в установах ПЗФ Карпатського регіону, можна класифікувати за функціональним призначенням на професійні системи управління та додатки для широкого громадського моніторингу.

На сьогодні SMART (Spatial Monitoring and Reporting Tool) є найбільш комплексним та масовим інструментом, що впроваджується в Україні. На відміну від звичайних картографічних додатків, SMART – це цілісна екосистема, яка включає настільну версію для аналізу та мобільний додаток. Використання сучасних цифрових інструментів, насамперед системи SMART та мобільних додатків, дозволяє мінімізувати помилки, стандартизувати методики досліджень згідно з міжнародними вимогами та суттєво підвищує ефективність наукової роботи в Карпатському регіоні, забезпечуючи точний і оперативний збір геоприв'язаних даних, їх стандартизацію та можливість довгострокового аналізу. Водночас специфічні умови Карпат складний гірський рельєф, значна лісистість і обмежене інтернет-покриття зумовлюють необхідність використання платформ із підтримкою офлайн-режиму та адаптації методів збору даних, що підсилює значення інтегрованого підходу, у якому SMART виступає базовим інструментом системного моніторингу, а інші додатки – як джерело додаткової наукової інформації. SMART дозволяє об'єднати розрізнені напрямки роботи установи ПЗФ (охорону, науку, рекреацію) у єдиному інформаційному полі. Її функціональність охоплює планування маршрутів, фіксацію спостережень із точною геоприв'язкою, облік порушень природоохоронного режиму та формування аналітичної звітності, що дозволяє перейти від фрагментованого збору інформації до системного управління територіями. Завдяки налаштуванню «Моделі даних» (Data Model), SMART трансформує суб'єктивні спостереження різних дослідників у стандартизовані записи, які створюють основу для їх порівняльності, довгострокового накопичення та використання у прийнятті управлінських рішень [5]. Це важливо для Карпатського регіону, де наукові співробітники працюють у географічно віддалених локаціях, але повинні подавати дані до єдиного «Літопису природи». Будь-яка інформація, що надходить до системи, має обов'язковий геопросторовий компонент, що дозволяє будувати динамічні карти поширення видів та прогнозувати зміни меж оселищ.

Використання серверної технології SMART Connect дозволяє перетворити платформу на живий організм, що працює в режимі реального часу. Дані, зібрані співробітниками за допомогою мобільних пристроїв у польових умовах, автоматично завантажуються на центральний сервер при появі мережі. Науковий відділ може оперативного коригувати маршрути моніторингу або давати завдання польовим групам на основі попередньо отриманих знахідок.

Значна цінність SMART полягає у здатності перетворювати «сирі» дані на аналітичні звіти, які є базою для прийняття управлінських рішень. Система дозволяє автоматично обчислювати складні показники, такі як щільність популяції на одиницю зусиль спостереження (Encounter Rate), що є об'єктивним критерієм стану біорізноманіття та виступає кінцевою точкою, куди імпортуються дані з вузькопрофільних додатків (наприклад, орнітологічні списки з eBird або знахідки флори з iNaturalist). Така взаємодія дозволяє поєднувати структуровані інституційні дані з масовими спостереженнями користувачів, розширюючи просторове та часове охоплення моніторингу. Це дозволяє науковцю бачити повну картину стану екосистеми в межах одного програмного інтерфейсу.

Функціонування SMART забезпечує автоматичну підготовку доказової бази для міжнародних аудитів та оцінювань. Зокрема, звіти, сформовані системою, безпосередньо використовуються для заповнення опитувальників METT та IMET, що є обов'язковою умовою для установ, які прагнуть відповідати європейським стандартам охорони довкілля. Тому SMART забезпечує не лише збір даних, але й підтримку управлінських рішень, що дозволяє розглядати його як основу формування єдиної системи моніторингу біорізноманіття.

Виходячи з вище наведеного можна зробити висновок, що цифровізація моніторингу біорізноманіття є ключовою умовою підвищення ефективності наукової роботи установ ПЗФ Карпатського регіону, при цьому центральну роль відіграє система SMART, яка забезпечує стандартизований збір, аналіз та використання геопросторових даних і підтримує прийняття управлінських рішень. Синергія професійного програмного забезпечення з іншими інструментами моніторингу біорізноманіття створює багаторівневу екосистему даних, яка забезпечує перехід від фрагментованого збору інформації до цілісного доказового управління біорізноманіттям Карпат.

1. Bonney, R., Cooper, C.B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K.V. and Shirk, J. 2009. Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience*, 59, 977-984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>

2. Hockings M. et al. Evaluating Effectiveness: A framework for assessing management effectiveness of protected areas. IUCN, 2006. 105 p.

3. IMET: Integrated Management Effectiveness Tool / JRC of the European Commission. URL: <https://rris.biopama.org/imet>

4. Three pilot areas of the project are testing SMART for biodiversity monitoring / URL: <https://snpa.in.ua/en/try-pilotni-ustanovy-proektu-testuyut-instrumentarij-smart-dlya-monitoryngu-bioriznomanittya/>

5. SMART Partnership. SMART Community Website : official portal. URL: <https://smartconservationtools.org/>

**Semak Uliana**  
**Vasyl Stefanyk Carpathian National University**

## **EARTH OBSERVATION FOR BIODIVERSITY MONITORING IN AGRICULTURAL LANDSCAPES OF UKRAINE**

Ukraine is one of Europe's most agriculturally intensive countries, with agricultural land covering approximately 70% of its territory, including more than 50% classified as arable land – one of the highest shares globally. This extensive land use has been associated with considerable ecological impacts. The large-scale conversion of natural ecosystems, the degradation of semi-natural habitats such as field margins, shelterbelts, wet meadows, and floodplain grasslands, as well as the intensification of crop production, have contributed to significant declines in agro-biodiversity. In particular, farmland bird populations in southeastern Ukraine have shown marked declines linked to

agricultural intensification [1], while the steppe zone – once among the most biodiverse grassland systems in Europe – has been reduced to fragmented remnants. At the same time, shelterbelts and field-margin vegetation, which serve as important biodiversity corridors and providers of ecosystem services, including pollination and natural pest control, remain insufficiently mapped and monitored at the national scale [2, 3]. In addition, ongoing military activities have introduced new pressures on agricultural landscapes, including land degradation, contamination, and disruptions in land management [4], further complicating biodiversity conservation and monitoring efforts.

Despite the scale and urgency of these trends, systematic and spatially comprehensive monitoring of biodiversity in Ukrainian agricultural landscapes remains limited. Existing assessments rely predominantly on point-based field surveys with restricted spatial coverage and temporal continuity. Currently, Ukraine lacks a fully operational national-scale agro-biodiversity monitoring system, and harmonized reference datasets required for large-scale modelling remain insufficiently developed. This monitoring gap is particularly critical given Ukraine's commitments under the Convention on Biological Diversity and the need to implement the Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework, as well as its ongoing development of the National Biodiversity Conservation Strategy up to 2035 and obligations related to EU accession – notably the EU Biodiversity Strategy for 2030 and the Farm to Fork Strategy, which set targets for reducing agricultural pressures on biodiversity. Beyond conservation commitments, functional agro-biodiversity is directly linked to food security: pollination services, natural pest control, and soil biota underpin sustainable crop production in a country that plays a significant role in global grain markets [3, 5].

Earth observation (EO) remote sensing offers a scalable and cost-effective framework for addressing these monitoring gaps. A key conceptual foundation for EO-based biodiversity assessment is the Spectral Variation Hypothesis (SVH), which posits that spatial heterogeneity in spectral reflectance serves as a proxy for habitat heterogeneity and, indirectly, species diversity. Spectral heterogeneity metrics – including Rao's Q (a quadratic entropy index of functional diversity) and the coefficient of variation of vegetation indices – have been shown to correlate with alpha- and beta-diversity across multiple taxonomic groups [6, 7], though the strength of this relationship in homogeneous crop-dominated landscapes requires empirical validation. Multi-temporal Sentinel-2 composites enable automated mapping of agro-ecological landscape elements – shelterbelts, field margins, buffer strips, and wetlands – which are key structural components of biodiversity in Ukrainian agricultural landscapes. Radar data (Sentinel-1) contribute cloud-independent structural observations particularly relevant for Ukraine's variable continental climate, while spaceborne LiDAR (NASA GEDI) enables assessment of vertical vegetation complexity at landscape scales [8]. Integration of EO-derived environmental predictors with citizen science datasets within machine learning frameworks supports the development of spatially explicit Species Distribution Models (SDMs) and the estimation of Essential Biodiversity Variables (EBVs) as standardized monitoring indicators [9, 10].

Several methodological challenges constrain the application of EO-based biodiversity monitoring in the Ukrainian context. The dominance of large homogeneous crop fields introduces mixed-pixel effects that complicate the detection of fine-scale semi-natural habitats. The near-complete absence of harmonized national biodiversity reference datasets limits model calibration and validation. The ongoing war has severely disrupted ground-based monitoring capacity across eastern and southern regions, further increasing reliance on remote sensing while simultaneously complicating field data collection for model training.

To address the identified monitoring gaps, we propose a hierarchical framework for agro-biodiversity monitoring in Ukrainian agricultural landscapes, operating simultaneously at the levels of species diversity and landscape complexity. At the landscape level, the framework integrates Sentinel-2 spectral heterogeneity metrics (Rao's Q, NDVI coefficient of variation) as proxies for habitat diversity with CNN-based mapping of key semi-natural agro-ecological elements – shelterbelts, field margins, wet meadows, and riparian buffers – derived from multi-temporal Sentinel-1/2 fusion composites. Landscape fragmentation and connectivity indices, calculated from the resulting habitat maps, provide a structural dimension that is not captured by spectral proxies alone, enabling

assessment of both habitat quality and inter-patch functional connectivity. At the species level, standardized field transect surveys – targeting vascular plants, farmland birds, and pollinators as indicator groups – are proposed as the primary empirical data source, with sampling design stratified according to EO-derived landscape heterogeneity classes. Statistical linkage between transect-based alpha- and beta-diversity estimates and co-located spectral heterogeneity metrics would enable calibration of EO proxies against direct biodiversity observations, establishing empirically grounded relationships between remotely sensed environmental gradients and species-level patterns across the agricultural matrix. These tiers are designed to be hierarchically consistent and mutually informative: landscape heterogeneity drives species distribution patterns, which in turn provide empirical grounding for EO proxy calibration at multiple spatial scales. Implemented together, this framework would provide Ukraine with a multi-scale, EO-anchored biodiversity monitoring system aligned with the requirements of the Kunming–Montreal Framework and EU biodiversity reporting standards.

Earth observation technologies constitute a critical infrastructure for bridging the biodiversity monitoring gap in Ukrainian agricultural landscapes. The combination of multi-sensor data fusion, machine learning, and citizen science integration provides a viable pathway toward a national-scale, EO-based agro-biodiversity monitoring system. Such a system would directly support Ukraine's obligations under the Kunming–Montreal Framework, facilitate alignment with EU biodiversity monitoring standards required for accession, and contribute to evidence-based agricultural and conservation policy in a context where both food security and ecological integrity are of strategic national and global importance.

1. Zymarioieva, A., Zhukov, O., Fedoniuk, T., & Svenning, J. (2022). Strong decline in breeding-bird community abundance throughout habitats in the Azov region (southeastern Ukraine) linked to land-use intensification and climate. *Diversity*, 14(12), 1028. <https://doi.org/10.3390/d14121028>
2. Pankova, S. O., & Kutsenko, M. I. (2025). Assessment of the current ecological state of forest shelterbelt ecosystems in the right-bank forest-steppe. *Taurida Scientific Herald. Series: Rural Sciences*, 142(2), 43–49. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.2.6>
3. Openko, I., Tykhenko, R., Kuzmych, L., Tykhenko, O., Tsvyakh, O., Rokochynskyi, A., Volk, P., & Halecki, W. (2025). Economic modeling of shelterbelt land use on agricultural production in Ukraine. *Land*, 14(11), 2236. <https://doi.org/10.3390/land14112236>
4. Kussul, N., Shelestov, A., Yailymov, B., Yailymova, H., Lemoine, G., & Deininger, K. (2024). Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using machine learning applied to Sentinel satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5009883>
5. Leal Filho, W., Fedoruk, M., Paulino Pires Eustachio, J. H., Barbir, J., Lisovska, T., Lingos, A., & Baars, C. (2023). How the war in Ukraine affects food security. *Foods*, 12(21), 3996. <https://doi.org/10.3390/foods12213996>
6. Rocchini, D., Marcantonio, M., & Ricotta, C. (2017). Measuring Rao's Q diversity index from remote sensing: An open source solution. *Ecological Indicators*, 72, 234–238. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.039>
7. Cavender-Bares, J., Gamon, J. A., Hobbie, S. E., Madritch, M. D., Meireles, J. E., Schweiger, A. K., & Townsend, P. A. (2017). Harnessing plant spectra to integrate the biodiversity sciences across biological and spatial scales. *American Journal of Botany*, 104(7), 966–969. <https://doi.org/10.3732/ajb.1700061>
8. Schneider, F. D., Ferraz, A., Hancock, S., Duncanson, L. I., Dubayah, R. O., Pavlick, R. P., & Schimel, D. S. (2020). Towards mapping the diversity of canopy structure from space with GEDI. *Environmental Research Letters*, 15(11), 115006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9e99>
9. Pereira, H. M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G. N., Jongman, R. H. G., Scholes, R. J., Bruford, M. W., Brummitt, N., Butchart, S. H. M., Cardoso, A. C., Coops, N. C., Dulloo, E., Faith, D. P., Freyhof, J., Gregory, R. D., Heip, C., Höft, R., Hurtt, G., Jetz, W., ... Wegmann, M. (2013).

10. Skidmore, A. K., Coops, N. C., Neinavaz, E., Ali, A., Schaepman, M. E., Paganini, M., Kissling, W. D., Vihervaara, P., Darvishzadeh, R., Feilhauer, H., Fernandez, M., Fernández, N., Gorelick, N., Geijzendorffer, I., Heiden, U., Heurich, M., Hobern, D., Holzwarth, S., Muller-Karger, F. E., ... Wingate, V. (2021). Priority list of biodiversity metrics to observe from space. *Nature Ecology & Evolution*, 5(7), 896–906. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01451-x>

Сенета Мар'яна

Національний університет «Львівська політехніка»

## ЗЕЛЕНІ НАНОТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ: ІНТЕГРОВАНІЙ МІЖДИСЦИПЛІНАРНИЙ ПІДХІД

На даний час суспільство стикається з гострими екологічними та ресурсними проблемами, які вимагають технологічних інновацій, нових підходів і проривних рішень. У зв'язку з цим світова спільнота дедалі більше орієнтується на впровадження стратегії екологічно орієнтованого розвитку, ключовим елементом якої є «зелені технології». Існує багато трактувань цього поняття, однак у даному контексті основний акцент робиться на зменшенні негативного впливу людської діяльності на довкілля. Досягнення цієї мети можливе різними способами, зокрема через скорочення утворення відходів, підвищення енергоефективності та зменшення використання природних ресурсів як у промисловості, так і в побутовій сфері [1].

Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується активним впровадженням інноваційних технологій, серед яких провідне місце займають нанотехнології. Водночас загострення глобальних екологічних проблем, зокрема зміни клімату, забруднення довкілля та виснаження природних ресурсів, актуалізує необхідність переходу до моделі сталого розвитку. У цьому контексті особливого значення набувають зелені нанотехнології, що поєднують високий науково-технічний потенціал із екологічними принципами. З позицій сучасної фізики, унікальні властивості наноматеріалів визначаються фундаментальними ефектами, що проявляються на масштабах 1–100 нм. Зокрема, квантове обмеження призводить до модифікації електронної структури речовини, зумовлюючи дискретизацію енергетичних рівнів та зміну ширини забороненої зони. Це відкриває можливості для керування оптичними та електронними властивостями матеріалів, що є критично важливим для підвищення ефективності фотокаталітичних процесів, сонячних елементів і сенсорних систем. Чутливість фізичних властивостей наноматеріалів до зовнішніх впливів лежить в основі функціонування інтелектуальних сенсорів для моніторингу стану довкілля в реальному часі. Проблематика застосування нанотехнологій у контексті сталого розвитку активно досліджується вітчизняними та зарубіжними науковцями [2–7]. Основна увага приділяється розробці безпечних наноматеріалів, зниженню їх токсичності та оцінці життєвого циклу. Важливим напрямом є інтеграція принципів зеленої хімії, які передбачають мінімізацію відходів і використання екологічно безпечних реагентів.

Метою дослідження є аналіз використання зелених нанотехнологій, визначення їх ролі у забезпеченні сталого розвитку та оцінка перспектив практичного застосування.

Зелені нанотехнології є напрямом розвитку нанонауки, що передбачає створення та використання наноматеріалів із врахуванням екологічних критеріїв (рис. 1):

- використання нетоксичних матеріалів;
- енергоефективність технологічних процесів;
- мінімізація відходів;
- можливість повторного використання ресурсів.

Такий підхід дозволяє знизити негативний вплив технологій на довкілля та здоров'я людини. Інтеграція зелених нанотехнологій у різні сектори сприяє підвищенню енергоефективності виробництва, зменшенню негативного впливу на довкілля та формуванню сталих моделей розвитку економіки на основі екологічно безпечних інновацій.

Наноматеріали (наночастки металів, оксиди металів, графен та його похідні тощо) характеризуються унікальними електронними, каталізаторними та оптичними властивостями. Це дозволяє створювати сенсори високої чутливості та селективності для виявлення забруднювачів повітря, води та ґрунту. Поєднання таких сенсорів із IoT-системами забезпечує збір, передачу та аналіз даних у режимі реального часу, що підвищує ефективність управління екологічними параметрами.



Рис. 1. Інтеграція зелених нанотехнологій у різні сектори економіки

У контексті сталого розвитку зелені нанотехнології розглядаються як ключовий інструмент досягнення балансу між економічним зростанням, соціальним добробутом та збереженням довкілля, що узгоджується з глобальними цілями сталого розвитку [8]. Завдяки фундаментальним фізичним механізмам – керуванню квантовими станами, інтенсифікації поверхневих процесів та оптимізації енерго- і масопереносу – наноматеріали забезпечують істотне підвищення ефективності використання ресурсів і зменшення енергоспоживання. Це проявляється у створенні високоефективних фотокаталітичних систем для очищення води й повітря, матеріалів для відновлюваної енергетики, а також сенсорних платформ для безперервного екологічного моніторингу. Водночас важливою складовою сталого розвитку є мінімізація життєвого циклу впливу наноматеріалів, включаючи їх безпечний синтез, використання та утилізацію, що потребує впровадження принципів «green chemistry» та циркулярної економіки [9].

Основні напрями застосування зелених нанотехнологій охоплюють енергетику, екологічний моніторинг, очищення води та повітря, медицину, сільське господарство, а також створення екологічно безпечних матеріалів і технологій для промислового виробництва (рис. 2). Інтеграція зелених нанотехнологій сприяє декарбонізації, зниженню екологічних ризиків і формуванню нової моделі технологічного розвитку, орієнтованої на довгострокову екологічну стійкість і ефективне використання природних ресурсів.

Наноматеріали широко використовуються для очищення води та повітря. Нанofільтри забезпечують видалення важких металів, органічних забруднювачів і патогенних мікроорганізмів. Каталітичні наночастинки сприяють розкладанню токсичних речовин.

У сфері відновлюваної енергетики нанотехнології сприяють підвищенню ефективності сонячних батарей, створенню високоефективних акумуляторів та розвитку водневої енергетики. Плазмонні та нанофотонні ефекти дозволяють підвищити ефективність поглинання та перетворення сонячної енергії, що робить ці технології критично важливими для переходу до відновлюваної енергетики нового покоління. У паралельному напрямі активно розвиваються наносенсорні системи, інтегровані з технологіями Інтернету речей (IoT), які забезпечують високочутливий та безперервний моніторинг екологічного стану довкілля [10].

Застосування нанодобрив і нанопестицидів дозволяє підвищити врожайність та зменшити негативний вплив на ґрунти. Інтелектуальні сенсорні системи забезпечують точне землеробство.

У медичній сфері нанотехнології використовуються для адресної доставки лікарських засобів, що підвищує ефективність лікування та знижує побічні ефекти.



Рис. 2. Вплив впровадження зелених нанотехнологій у різні сфери людської діяльності

Переваги та обмеження зелених нанотехнологій визначаються їх високою ефективністю у зменшенні екологічного навантаження, підвищенні енергоощадності та створенні інноваційних матеріалів, водночас супроводжуючись викликами, пов'язаними з недостатньою вивченістю довгострокового впливу наноматеріалів на здоров'я людини і довкілля, високою вартістю впровадження та потребою у вдосконаленні нормативно-правової бази.

До основних переваг зелених нанотехнологій належать:

- підвищення ефективності використання ресурсів;
- зменшення екологічного навантаження;
- інноваційний розвиток економіки;
- покращення якості життя населення.

Проте, існують певні ризики:

- недостатнє дослідження впливу наночастинок на біосферу;
- складність утилізації наноматеріалів;
- високі витрати на розробку та впровадження;
- потреба у нормативно-правовому регулюванні.

Отже, зелені нанотехнології є перспективним напрямом науково-технічного розвитку, що забезпечує поєднання інноваційності та екологічної безпеки. Їх використання сприяє ефективному вирішенню глобальних екологічних проблем і забезпечує реалізацію принципів сталого розвитку. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на підвищення безпечності наноматеріалів, удосконалення методів їх утилізації та розробку ефективних механізмів регулювання. Зелені нанотехнології, базуючись на фундаментальних принципах квантової фізики, фізики твердого тіла та фізики поверхневих явищ, формують науково-технологічну основу для переходу до ресурсоефективної та екологічно безпечної економіки. Їх інтеграція у різні галузі промисловості та системи екологічного моніторингу відкриває нові можливості для зниження антропогенного навантаження на довкілля та досягнення глобальних цілей сталого розвитку.

Сучасний стан досліджень свідчить, що зелені нанотехнології формують міждисциплінарну наукову платформу, яка об'єднує фізику конденсованого стану, матеріалознавство, хімію поверхні та екологічну інженерію. Їх розвиток відкриває нові можливості для декарбонізації економіки, підвищення ефективності використання ресурсів і створення інтелектуальних екологічних систем моніторингу, що є фундаментально важливим для реалізації глобальних цілей сталого розвитку.

Перспективи розвитку зелених нанотехнологій пов'язані з подальшою інтеграцією екологічно безпечних методів синтезу наноматеріалів у промисловість, енергетику, медицину та системи моніторингу довкілля. Очікується, що такі технології відіграватимуть ключову роль у зменшенні токсичних відходів, скороченні енергоспоживання та переході до циркулярної економіки. Особливо важливим є розвиток біосумісних наноматеріалів, "зелених" методів синтезу та інтелектуальних наносенсорів для реального часу контролю екологічних параметрів. У перспективі це сприятиме підвищенню ефективності екологічного моніторингу, зниженню антропогенного навантаження на довкілля та сприятиме забезпеченню сталого розвитку.

1. Василенко, І.А., Чупринов, Є.В., Іванченко, А.В., Скиба, М.І., Воробйова, В.І., & Галиш, В.В. (2019). *Зелені технології у промисловості*. Дніпро: Акцент ПП.

2. Kumar, A., Tyagi, P. K., Tyagi, S., et al. (2024). Integrating green nanotechnology with sustainable development goals: A pathway to sustainable innovation. *Discover Sustainability*, 5, 364. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00610-x>

3. Larrañaga-Tapia, M., Betancourt-Tovar, B., Videa, M., Antunes-Ricardo, M., & Cholula-Díaz, J. L. (2024). *Nanoscale Advances*, 6, 51. <https://doi.org/10.1039/D3NA00761H>

4. Ferdush, J., Rahman, M.M., Parvez, M.M.H., Mohotadi, M.A.A., & Uddin, M.N. (2025). Green-synthesized nanomaterials for water disinfection: Mechanisms, efficacy, and environmental safety. *Nanomaterials*, 15(19), 1507. <https://doi.org/10.3390/nano15191507>

5. Hasan, N., Muthu, M., Hakami, O., & Gopal, J. (2025). Assessing the sustainability of energy-related nanomaterial synthesis: Emphasizing energy-efficient preparation techniques. *Energies*, 18(3), 523. <https://doi.org/10.3390/en18030523>

6. Elgarahy, A. M., Elwakeel, K. Z., Akhdhar, A., & Hamza, M. F. (2021). Recent advances in greenly synthesized nanoengineered materials for water/wastewater remediation: An overview. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 6, 1–24.

7. Цехмістренко, С. І., Бітюцький, В. С., & Цехмістренко, О. С. (2024). Використання зелених нанотехнологій у розвитку тваринництва в аспекті досягнення цілей сталого розвитку. *Пріоритетні напрямки повоєнного відновлення аграрного сектору в аспекті досягнення цілей сталого розвитку: матеріали міжнародної науково-практичної конференції*. 151–153. Біла Церква: БНАУ.

8. United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

9. Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press.

10. Hussain, M. A., Mishra, S., Bora, N. V., & Bora, L. V. (2024). Green nanomaterials based nanosensors. In C. M. Hussain (Ed.), *Comprehensive analytical chemistry*, 105, 171–189, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2023.07.001>

Струс Юрій, Струс Василина, Скольський Ігор  
*Природний заповідник «Розточчя»*

## **BIOMON: ВІДКРИТА ВЕБ-СИСТЕМА ОБРОБКИ ДАНИХ ФОТОПАСТОК ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ССАВЦІВ У ПРИРОДНОМУ ЗАПОВІДНИКУ «РОЗТОЧЧЯ»**

Фотопастки стали ключовим інструментом моніторингу наземних ссавців у природоохоронних територіях, забезпечуючи об'єктивні, верифіковані і повторювані дані [2; 8]. Однак при масштабуванні мережі – від поодиноких камер до десятків – потоки знімків швидко перевищують можливості ручної обробки. Систематизація, видова верифікація, статистичний аналіз і стандартизована публікація даних потребують спеціалізованих інформаційних інструментів.

У Природному заповіднику «Розточчя» з 2020 р. реалізовано систематичний моніторинг ссавців за допомогою фотопасток [6]. Паралельно розроблено власну веб-систему biomon – модульний Flask-додаток на Python 3 із СКБД PostgreSQL 16. Систему планується відкрити як open-source після завершення базового функціоналу, що дозволить перевикористати її в інших об'єктах природно-заповідного фонду України.

Архітектура. Модуль обробки фотопасток (camera\_traps) реалізований як окремий компонент із власною базою даних ct\_db, що містить 17 таблиць чотирьох категорій: довідникові (таксономія species, біотопи), основні (location, observation, photo, identification, upload\_batch), аналітичні (location\_monthly\_activity, species\_yearly\_trend, location\_stats) і сервісні (service\_visit, user\_profile, location\_merge\_log).

Ключові алгоритми системи: (1) sliding-window-групування – знімки фотопастки автоматично об'єднуються у серії з порогом 60 секунд між сусідніми кадрами, що відображає природну тривалість одного спрацювання сенсора руху; (2) консенсусний механізм видової верифікації – анонімне незалежне голосування  $\geq 2$  верифікаторів за серію визначає кінцевий статус (completed / needs\_review), що мінімізує суб'єктивні помилки одного спостерігача [3]; (3) bootstrap-розрахунок 95 % довірчих інтервалів (1000 ітерацій) для стандартизованого індексу detection rate, який обчислюється для кожної комбінації {вид, локація, рік}; (4) експорт у форматі Darwin Core [7] через СТЕ-запит з трьома логічними шарами (ObservationConsensus, RankedConsensus, BaseData), що генерує CSV-файл з 25+ полями DwC, придатний для прямого завантаження у GBIF.

Для практичного експлуатування реалізовано п'ятирівневу ієрархію ролей користувачів (viewer → ct\_verifier → analyst → manager → admin), інституційну фільтрацію доступу через параметризовані SQL-запити, фонові задачі архівування знімків (старших 30 днів) та email-нагадування верифікаторам. Локалізація українською й англійською здійснена через Flask-Babel.

Результати моніторингу. Станом на квітень 2026 р. у системі оброблено понад 94 000 знімків, 5 841 серію спостережень, 1 650 пасткоднів за 36 локаціями. Підтверджено зростання чисельності козулі європейської (*Capreolus capreolus*) – RAI до 23 у 2025 р., – відновлення популяції кабана дикого (*Sus scrofa*) після епізоотії африканської чуми свиней [4], а також регулярну присутність kota лісового (*Felis silvestris*) з лютого 2024 р., раніше вважуваного фактично відсутнім у заповіднику [9].

Висновки. biomon демонструє ефективність комплексного підходу до автоматизації біомоніторингу: поєднання сучасних польових методик з відкритими програмними рішеннями забезпечує об'єктивні, верифіковані та готові до публікації у GBIF дані. Архітектурні принципи

– окрема БД, sliding-window-групування серій, консенсусна верифікація, bootstrap-аналіз, експорт у Darwin Core – є практичним шаблоном для подібних проєктів.

1. Kays, R., Arbogast, B. S., Baker-Whatton, M., Beirne, C., Boone, H. M., Bowler, M., ... Spironello, W. R. (2020). An empirical evaluation of camera trap study design: how many, how long and when? *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), 700–713. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13370>
2. O'Connell, A. F., Nichols, J. D., & Karanth, K. U. (Eds.). (2011). *Camera traps in animal ecology: Methods and analyses*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-99495-4>
3. King, C. M., Powell, R. A., & Powell, C. (2006). *The natural history of weasels and stoats: Ecology, behavior, and management*. Oxford University Press.
4. Sauter-Louis, C., Conraths, F. J., Probst, C., Blohm, U., Schulz, K., Sehl, J., ... Blome, S. (2021). African swine fever in wild boar in Europe – A review. *Viruses*, 13(9), 1717. <https://doi.org/10.3390/v13091717>
5. Rigoudy, N., Dussert, G., Benyoub, A., Besnard, A., Birck, C., Boyer, J., ... Chamaillé-Jammes, S. (2023). The DeepFaune initiative: a collaborative effort towards the automatic identification of European fauna in camera trap images. *European Journal of Wildlife Research*, 69(6), 113. <https://doi.org/10.1007/s10344-023-01742-7>
6. Strus, Yu., Strus, V., Dykyy, I., & Tarasova, A. (2026). Results of large mammal monitoring in the Roztochya Nature Reserve over 40 years of observation, 1984–2025. *Studia Biologica*, 20(1), 103–126. <https://doi.org/10.30970/sbi.2001.865>
7. Wiczorek, J., Bloom, D., Guralnick, R., Blum, S., Döring, M., Giovanni, R., ... Vieglaiss, D. (2012). Darwin Core: An evolving community-developed biodiversity data standard. *PLoS ONE*, 7(1), e29715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029715>
8. Rovero, F., & Zimmermann, F. (Eds.). (2016). *Camera trapping for wildlife research*. Pelagic Publishing.
9. Zagorodniuk, I., Gavrilyuk, M., Drebet, M., Skilsky, I., Andrusenko, A., & Pirkhal, A. (2014). Wildcat (*Felis silvestris* Schreber, 1777) in Ukraine: Modern state of the population and eastwards expansion of the species. *Studia Biologica*, 8(3-4), 233–254. <https://doi.org/10.30970/sbi.0803.372>

**Терпеливець Станіслав, Черепанин Роман**  
*Карпатський національний університет імені Василя Стефаника*

## **ВИКОРИСТАННЯ ПЛАТФОРМИ INATURALIST ДЛЯ РОЗВИТКУ ГРОМАДЯНСЬКОЇ НАУКИ В ПРИРОДООХОРОННИХ УСТАНОВАХ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ**

Збереження біорізноманіття Карпатського регіону є одним із стратегічних пріоритетів екологічної політики України. У сучасних умовах зростання антропогенного навантаження та кліматичних змін, традиційні методи екологічного моніторингу потребують розширення за рахунок інформаційних технологій та залучення громадськості. Планові наукові польові дослідження в природоохоронних установах регіону систематично стикаються з браком кадрових і фінансових ресурсів. В умовах збройного конфлікту ці обмеження загострилися: частина наукового персоналу евакуйована, доступ до ряду прикордонних заповідних зон ускладнений, а бюджети установ суттєво скорочені. У цьому контексті цифрові платформи громадянської науки (citizen science) набувають ролі реального, а не допоміжного інструменту екологічного моніторингу (Mason et al., 2025; iNaturalist. 2024). Тому, метою роботи є оцінка потенціалу платформи iNaturalist для розширення бази даних біорізноманіття та розвитку

мережі громадянських науковців у природоохоронних установах Українських Карпат, а також запропонувати практичну схему її впровадження.

Платформа iNaturalist, розроблена спільно California Academy of Sciences та National Geographic Society, поєднує функції соціальної мережі, бази даних спостережень та інструменту автоматичної ідентифікації видів за допомогою алгоритмів машинного навчання. Ключовою перевагою системи є можливість формування георозподілених проєктів (Projects), які дозволяють природоохоронним установам централізовано збирати, верифікувати та експортувати дані у стандартизованих форматах (CSV, Darwin Core). Серед доступних платформ iNaturalist виокремлюється найширшим таксономічним охопленням, вбудованою системою AI-ідентифікації та відкритим API (Application Programming Service – набір правил, інструментів та протоколів, що дозволяє різним комп'ютерним програмам та сервісам взаємодіяти між собою).

Ключові переваги iNaturalist для природоохоронних установ регіону є: (1) вбудована комп'ютерна модель ідентифікації видів (Computer Vision) з точністю до 85 % для карпатської флори та фауни; (2) офлайн-режим мобільного застосунку – критично важливий в зонах зі слабким мережевим покриттям; (3) повна сумісність із GBIF уможливорює автоматичне поповнення міжнародних баз даних; (4) відкритий API забезпечує інтеграцію із ГІС-системами установ та Національною інфраструктурою геопросторових даних.

Впровадження iNaturalist у діяльність природоохоронних установ Українських Карпат передбачає кілька етапів. По-перше, створення офіційних проєктів під егідою конкретної установи з чіткими протоколами збору даних. По-друге, навчання співробітників та волонтерів правилам фотофіксації, геотегування та базової таксономічної верифікації. По-третє, інтеграція отриманих даних у внутрішні інформаційні системи установ для подальшого аналізу та прийняття управлінських рішень. Досвід європейських аналогів демонструє, що такий підхід дозволяє збільшити обсяг екологічних даних у 3-5 разів без пропорційного зростання витрат на польові дослідження. Яскравий приклад збільшення даних у заповіднику Рам'єр (Франція) завдяки платформі «Pl@ntNet» (Bonnet et al., 2020).

Запропонована трирівнева схема впровадження iNaturalist охоплює: інституційний рівень – реєстрація офіційного проєкту установи на платформі та призначення модераторів із числа співробітників; комунікаційний рівень – залучення волонтерів через туристичні організації, освітні заклади та НУО; аналітичний рівень – періодичне вивантаження даних через API, їхня статистична обробка та актуалізація моніторингових баз установ.

Стійкість громадянської науки в Україні підтверджується статистично: за перший рік повномасштабної війни кількість спостережень на iNaturalist по країні становила 96% від довоєнного рівня (Prylutskyi, O., & Kapets, 2024). При цьому саме в Карпатському регіоні зафіксовано тенденцію зростання активності у 2022 р. на тлі спаду у східних та центральних областях (iNaturalist, 2024). Паралельно українські наукові установи наростили публікацію даних у GBIF: з початку 2022 р. додано понад 170 000 нових записів, що є приростом на 34% (Bonney et al., 2009).

Платформа iNaturalist є ефективним і масштабованим інструментом розвитку громадянської науки в природоохоронних установах Українських Карпат. Волонтерські спостереження здатні суттєво компенсувати скорочення планових наукових виходів в умовах воєнного стану та ресурсних обмежень. Запропонована трирівнева схема впровадження не вимагає значних додаткових витрат і може бути адаптована для будь-якої установи природно-заповідного фонду регіону. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку методики статистичної корекції потенційних просторових і таксономічних упереджень у волонтерських даних.

1. Bonnet, P., Joly, A., Deneu, B., Servajean, M., Kahl, S., Glotin, H., ... & Planqué, R. 2020. How citizen scientists contribute to monitor protected areas thanks to automatic plant identification tools. *Ecol Solut Evidence*, 1. e12023. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12023>

2. Bonney, R., Caren, B., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. 2009. Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
3. iNaturalist. 2024. 2024 Year in Review. <https://www.inaturalist.org/stats/2024>
4. Mason, B. M., Mesaglio, T., Heitmann, J. B., Chandler, M., Chowdhury, S., Gorta, S. B. Z., ... & Callaghan, C. T. 2025. iNaturalist accelerates biodiversity research. *BioScience*, 75(11), 953–965. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaf104>
5. Prylutskyi, O., & Kapets, N. 2024. State-of-the-art of iNaturalist as a source of data on Ukrainian fungi. *Citizen Science: Theory and Practice*, 9(1), 717. <https://doi.org/10.5334/cstp.717>

**Ткачов Віталій, Рубан Ігор**  
*Харківський національний університет радіоелектроніки*

## **ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РОБАСТНОЇ ВАРІАЦІЙНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ**

Сучасні задачі екологічного моніторингу дедалі частіше вирішують із застосуванням інформаційних систем на мобільних платформах (ІСМП), зокрема на безпілотних літальних апаратах, автономних наземних засобах тощо [1–2]. Такі ІСМП забезпечують збір, передавання та первинне оброблення даних про стан атмосферного повітря, водних об'єктів, ґрунтів і техногенно навантажених територій. Їх практична цінність визначається здатністю оперативно працювати у важкодоступних або потенційно небезпечних зонах, однак функціонування відбувається в умовах обмеженого ресурсного забезпечення, нестабільної зв'язності, змінної інтенсивності потоку даних і можливих деструктивних впливів [3–4]. За таких умов ефективність екологічного моніторингу визначається точністю вимірювань та здатністю ІСМП зберігати допустимий режим функціонування протягом інтервалу виконання місії [5].

У типових режимах керування ІСМП підтримка високої інтенсивності збору, обробки та передачі екологічних даних дозволяє зберігати повноту спостереження, однак прискорює виснаження доступного ресурсу платформи та зменшує тривалість функціонування ІСМП. Натомість жорстка економія ресурсів знижує навантаження на платформу, проте спричиняє зростання затримок при передачі даних і деактуалізацію результатів моніторингу для оперативного реагування. За наявності нестабільного зв'язку, перевантажень або часткових відмов фіксовані та евристичні політики керування не забезпечують узгодженого балансу між якістю моніторингу та збереженням працездатності ІСМП. Тому для ІСМП у задачах екологічного моніторингу доцільним є застосування методу, який враховує саме траєкторію функціонування системи на інтервалі часу з урахуванням дії несприятливих сценаріїв [6].

Метою роботи є дослідження практичної застосовності методу робастної варіаційної оптимізації для керування функціонуванням інформаційної системи екологічного моніторингу на мобільній платформі. Такий метод доцільно розглядати як засіб вибору керувальних впливів, що забезпечують утримання ІСМП у межах допустимого режиму функціонування протягом інтервалу виконання місії.

У задачі екологічного моніторингу стан ІСМП можна задати так:

$$\overset{\text{r}}{x}_{k+1} = f(\overset{\text{r}}{x}_k, \overset{\text{r}}{u}_k, \overset{\text{r}}{w}_k), \quad (1)$$

де  $\overset{\text{r}}{x}_k$  – вектор стану ІСМП на такті  $k$ , компоненти якого відображають дефіцит якості обслуговування потоку даних спостереження, затримку надходження критичних повідомлень, обсяг необробленої інформації та залишок доступного ресурсу платформи;  $\overset{\text{r}}{u}_k$  – вектор керувальних впливів, що задає інтенсивність використання бортових обчислювальних засобів, розподіл пропускну здатності між потоками даних, режим локального оброблення результатів

вимірювань і частоту передавання телеметрії;  $\vec{w}_k$  – вектор деструктивних впливів, який відображає погіршення зв'язку, зростання навантаження, часткові відмови вузлів або зменшення доступного ресурсу;  $f()$  – оператор переходу стану, що визначає зміну стану ІСМП на наступному такті.

У прикладній постановці стан  $x_k$  доцільно формувати як вектор показників дефіциту якості обслуговування потоку даних спостереження, затримки надходження критичних повідомлень, обсягу необробленої інформації та залишку доступного ресурсу платформи. Вектор керувальних впливів  $\vec{u}_k$  визначає інтенсивність використання бортових обчислювальних засобів, розподіл пропускну здатності між потоками даних, режим локального оброблення вимірювань і частоту передавання телеметрії. Така постановка узгоджується з дискретно-часовим поданням функціонування ІСМП та дає змогу розглядати траєкторію стану як об'єкт оптимізації.

Допустимий режим функціонування ІСМП задається множиною станів:

$$G = \{x_k \mid d_k \leq d_{\max}, r_k \geq r_{\min}\}, \quad (2)$$

де  $d_k$  – узагальнений показник дефіциту обслуговування потоку екологічних даних на такті  $k$ , який відображає відхилення фактичного режиму надходження та оброблення даних від допустимого;  $d_{\max}$  – граничне значення показника  $d_k$ , перевищення якого означає втрату оперативної придатності результатів спостереження;  $r_k$  – доступний ресурс платформи на такті  $k$ , що характеризує залишок ресурсного забезпечення;  $r_{\min}$  – мінімальний рівень ресурсу, достатній для підтримання критичного контуру моніторингу.

Отже, множина  $G$  (2) задає ті стани ІСМП (1), у яких ще забезпечується надходження екологічних даних із прийнятною оперативністю та зберігається ресурсна спроможність продовжувати місію. Для врахування варіативності умов функціонування та деструктивних впливів використовується робастний критерій вибору керувальних впливів:

$$J^R(u) = \max_{s \in S} J(u, s), \quad (3)$$

де  $S$  – множина допустимих сценаріїв деструктивних впливів на інтервалі керування, причому кожний сценарій  $s$  задає конкретну реалізацію погіршення зв'язку, зростання інтенсивності потоку вимірювань, часткової втрати вузлів або зниження доступного ресурсу;  $J(u, s)$  – інтегральний функціонал витрат функціонування ІСМП за керування  $u$  у сценарії  $s$ , який узагальнює втрати від зростання дефіциту обслуговування, виснаження ресурсу та наближення траєкторії стану до меж множини  $G$ .

Тоді критерій  $J^R(u)$  (3) визначає найгірше значення функціонала на множині сценаріїв  $S$  і, відповідно, орієнтує вибір керування не на номінальний, а на критичний режим розвитку подій. У задачі екологічного моніторингу це означає, що керувальні рішення мають забезпечувати збереження працездатності ІСМП за найбільш несприятливих, але припустимих умов виконання місії.

Практичне застосування методу ґрунтується на циклічному оперативному керуванні ресурсами ІСМП на кожному такті оновлення телеметрії. На початку циклу оцінюють поточний ресурсний стан платформи, інтенсивність надходження даних і близькість траєкторії до меж допустимого режиму. Далі формують короткострокову множину сценаріїв несприятливих впливів, прогнозують відповідні траєкторії функціонування та вибирають керувальний вплив, що мінімізує найгірші очікувані витрати за збереження працездатності критичних функцій моніторингу. У реальному режимі реалізують лише найближчий керувальний вплив, після чого цикл повторюють для оновленого стану системи та середовища. Така організація надає керуванню ситуаційно залежного характеру: за допустимих умов ІСМП може підтримувати інтенсивніший режим збору, локального оброблення та передавання даних, а за зростання

ризикі виходу з множини  $G$  – обмежувати другорядні навантаження для збереження критичних функцій спостереження.

Практичну придатність методу доцільно проілюструвати на ІСМП, що виконує екологічне спостереження за техногенно навантаженою територією та передає результати вимірювань концентрацій забруднювальних речовин, координати аномальних зон і службову телеметрію. У такому сценарії визначальними є своєчасність надходження повідомлень про перевищення порогових екологічних показників та збереження ресурсу платформи на всьому інтервалі місії. Для оцінювання методу розглянуто імітаційний приклад із порівнянням базової політики керування, що не враховує варіацію сценаріїв і близькість траєкторії до меж допустимої області, та робастно-варіаційної політики, сформованої за критерієм найгіршого випадку. Основну увагу зосереджено на динаміці залишку доступного ресурсу  $r_k$ , оскільки саме цей показник безпосередньо визначає тривалість збереження працездатності ІСМП у несприятливих умовах.

На рис. 1 наведено порівняння політик за посиленого сценарію деструктивних впливів. Видно, що базова політика довше утримує інтенсивніший режим функціонування, однак це супроводжується прискореним виснаженням ресурсу, внаслідок чого критичний рівень  $r_{\min}$  досягається вже приблизно на 18-му такті. Натомість робастно-варіаційна політика забезпечує повільніше зниження ресурсу та відтягує момент досягнення критичного рівня приблизно до 27-го такту. Така різниця свідчить, що запропонований підхід перерозподіляє ресурс у спосіб, який є вигіднішим з позиції збереження працездатності системи.

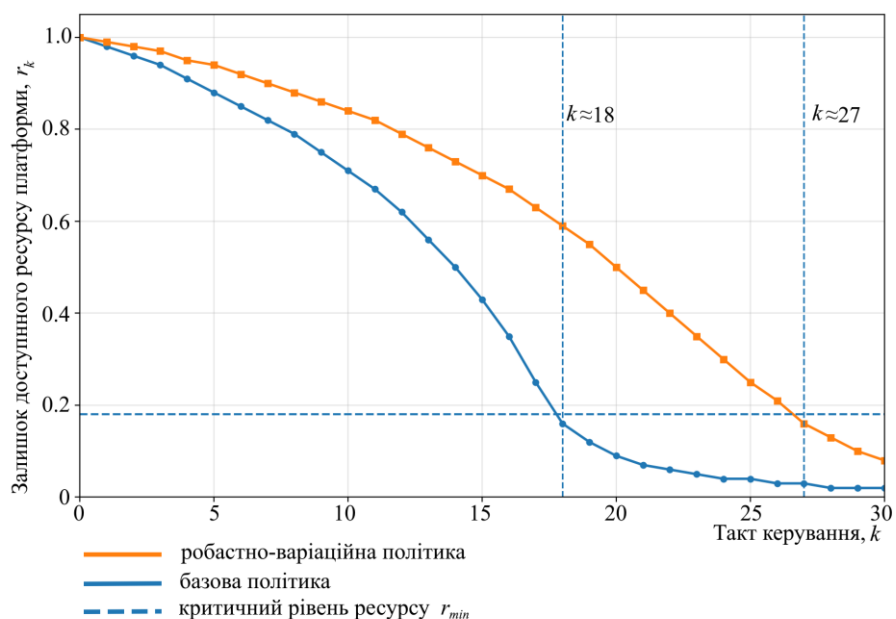


Рис. 1. Динаміка залишку доступного ресурсу за посиленого сценарію деструктивних впливів

Як показано на рис. 1, у посиленому сценарії деструктивних впливів базова політика керування забезпечує інтенсивніше використання ресурсу на початковому інтервалі, однак це приводить до швидшого досягнення критичного рівня  $r_{\min}$ . Натомість робастно-варіаційна політика характеризується більш пологим спаданням кривої  $r_k$ , що свідчить про стриманіше витрачання ресурсу та більший запас часу до переходу системи в критичний режим. Таким чином, рисунок наочно підтверджує, що запропонований метод змінює характер використання ресурсу з орієнтацією на подовження інтервалу працездатного функціонування ІСМП за несприятливих умов.

Для ІСМП екологічного моніторингу це означає, що за погіршення зв'язку, зростання потоку вимірювань або часткового зниження доступного ресурсу робастно-варіаційний підхід

забезпечує довший інтервал збереження критичних функцій спостереження та передавання найбільш важливих повідомлень. Отже, практичний ефект методу полягає у відтермінуванні критичного виснаження ресурсу мобільної платформи та подовженні інтервалу корисного функціонування ІСМП у посиленому режимі деструктивних впливів.

**Висновки.** Проведений аналіз показав доцільність застосування методу робастної варіаційної оптимізації для керування інформаційною системою екологічного моніторингу на мобільній платформі за нестабільного зв'язку, динамічних збурень та обмеженого ресурсного забезпечення. Метод забезпечує вибір керувальних впливів з урахуванням найгірших допустимих сценаріїв і орієнтує керування на утримання ІСМП у межах допустимого режиму функціонування. За результатами моделювання встановлено, що порівняно з базовою політикою робастно-варіаційний підхід забезпечує повільніше виснаження ресурсу та відтерміновує досягнення його критичного рівня за посиленого сценарію деструктивних впливів. Для задач екологічного моніторингу це означає подовження інтервалу збереження критичних функцій спостереження та передавання найбільш важливих повідомлень. Отже, метод є практично придатним для ІСМП, що працюють у техногенно небезпечних або важкодоступних зонах, де визначальними є своєчасність надходження даних і збереження ресурсної спроможності платформи.

1. Schneider C., Valacich J. *Information Systems Today: Managing in the Digital World, Global Edition*. Pearson Education, Limited, 2022. 568 p.

2. Kliushnikov, I., Kharchenko, V., Fesenko, H., Zaitseva, E., & Levashenko, V. (2023). Reliability Models of Multi-state UAV-based Monitoring Systems: Mission Efficiency Degradation Issues. In *2023 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. IEEE. P. 299–306. <https://doi.org/10.1109/idt59031.2023.10194443>.

3. Segovia-Ferreira, M., Rubio-Hernan, J., Cavalli, A. R., & Garcia-Alfaro, J. (2024). A Survey on Cyber-Resilience Approaches for Cyber-Physical Systems. *ACM Computing Surveys*. <https://doi.org/10.1145/3652953>.

4. Brunke, L., Greeff, M., Hall, A. W., Yuan, Z., Zhou, S., Panerati, J., & Schoellig, A. P. (2022). Safe Learning in Robotics: From Learning-Based Control to Safe Reinforcement Learning. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 5(1). <https://doi.org/10.1146/annurev-control-042920-020211>.

5. Chen, H., Lin, S., Smolka, S. A., & Paoletti, N. (2022). An STL-Based Formulation of Resilience in Cyber-Physical Systems. In *Lecture Notes in Computer Science* (P. 117–135). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-15839-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15839-1_7).

6. Рубан, І. В., Ткачов, В. М. (2025). Метод робастної варіаційної оптимізації траєкторій функціонування інформаційної системи на мобільній платформі в умовах деструктивних впливів. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 3(4(95)), 195–212. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.3.23>.

**Тріандофіліді Леонід, Черепанин Роман**  
**Карпатський національний університет імені Василя Стефаника**

## **КОНЦЕПЦІЯ CRM/GIS-СИСТЕМИ З ЕЛЕМЕНТАМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИСОКОГІРНИХ ТЕРИТОРІЙ КАРПАТ**

Карпатський регіон України характеризується значними екологічними та соціально-економічними викликами, серед яких деградація природного середовища, техногенне навантаження, нераціональне використання природних ресурсів та диспропорції економічного розвитку. Інтенсивна вирубка лісів, розвиток сировинно-видобувних галузей та зростання

антропогенного впливу призводять до порушення екологічної рівноваги, збільшення частоти повеней, зсувів та інших небезпечних природних явищ (Химинець, 2012).

У сучасних умовах цифровізації, гірські території поступово втрачають ознаки ізольованих периферій та інтегруються у ширші соціально-економічні системи (Bürgin, 2021). Водночас цифрова трансформація має нерівномірний характер та супроводжується як новими можливостями, так і проявами цифрового розриву між урбанізованими та віддаленими регіонами.

Важливим напрямом є використання технологій штучного інтелекту для короткострокового прогнозування природних процесів. Моделі глибокого навчання здатні виявляти складні просторово-часові закономірності у кліматичних та гідрологічних даних, однак демонструють обмежену ефективність при прогнозуванні екстремальних опадів, що є критичним для систем раннього попередження. Перспективним підходом є переорієнтація навчання моделей на прогнозування перевищення порогових значень, що суттєво підвищує їх практичну цінність для прийняття управлінських рішень (Ayzel & Heistermann, 2025).

Метою дослідження є розробка концепції інтегрованої CRM/GIS-системи екологічного моніторингу високогірних територій Карпат, яка поєднує збір даних із сенсорних мереж, дистанційного зондування Землі та метеорологічних спостережень із їх обробкою у цифровому середовищі та застосуванням методів штучного інтелекту для підтримки прийняття управлінських рішень.

Запропонована система передбачає використання CRM-підходу для структурування та управління потоками екологічних даних, що дозволяє інтегрувати інформацію з різних джерел, забезпечувати її аналіз та візуалізацію в GIS-середовищі, а також формувати аналітичні звіти для різних груп користувачів. Особлива увага приділяється використанню моделей штучного інтелекту для прогнозування небезпечних природних явищ на основі порогових значень – підходу, що довів свою ефективність у порівнянні з регресійними моделями (Ayzel & Heistermann, 2025).

Практична реалізація концепції розглядається на базі Міжнародного наукового та освітнього центру «Обсерваторія» Карпатського національного університету імені Василя Стефаника на горі Піп Іван в Українських Карпатах, як унікального високогірного наукового об'єкта, що забезпечує можливість збору довготривалих екологічних та кліматичних даних.

Таким чином, впровадження інтегрованої CRM/GIS-системи з елементами штучного інтелекту сприятиме підвищенню ефективності прогнозування природних явищ, зменшенню екологічних ризиків та забезпеченню сталого моніторингу високогірних територій Карпат.

1. Химинець, В. В. (2012). Карпатський регіон у контексті сталого розвитку України. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Економіка*, 36, 192–197.

2. Bürgin, R. (2021). *Digitalization in the mountains: Digital transformations and digital multilocality in Swiss mountain areas* [Doctoral dissertation, University of Bern]. <https://doi.org/10.48549/3645>

3. Ayzel, G., & Heistermann, M. (2025). Training of AI-based nowcasting models for rainfall early warning should take into account user requirements. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25, 41–47. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-41-2025>

## **СЕКЦІЯ 2. БЕЗПЕКА ДОВКІЛЛЯ В УМОВАХ ВІЙНИ: ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ВИКЛИКИ СЬОГОДЕННЯ**

**Баран Мар'яна**  
*Національний університет «Львівська політехніка»*  
**Васькович Ростислав**  
*Стрийський ліцей імені Героя України Андрія Корчака*

### **ЦИФРОВА ПАРАДИГМА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННИХ ВИКЛИКІВ ТА ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ: ІНТЕГРОВАНІЙ ІТ-ПІДХІД**

Повномасштабна військова агресія проти України спровокувала безпрецедентну екологічну катастрофу [1], масштаби якої дозволяють кваліфікувати її як глобальний екоцид. Пошкодження критичної інфраструктури, масовані лісові пожежі, забруднення ґрунтів важкими металами та руйнація екосистем створюють загрози, що виходять далеко за національні кордони. Особлива складність полягає в тому, що традиційні методи екологічного моніторингу, які базуються на безпосередньому фізичному відборі проб та наземних інспекціях, у зонах активних бойових дій є смертельно небезпечними або технічно неможливими. Це створює інформаційний вакуум, який заважає як оперативному реагуванню, так і довгостроковому плануванню відновлення. Актуальність теми зумовлена необхідністю негайного впровадження новітніх інформаційних технологій, здатних об'єднати розрізнені дані з галузей права, економіки, інженерії та державного управління у єдину інтелектуальну систему. Метою даного дослідження є обґрунтування створення національної цифрової платформи, яка на основі Big Data, дистанційного зондування Землі та штучного інтелекту забезпечить безперервний цикл моніторингу, документування та оцінки воєнних збитків довкіллю.

Фундаментом системи забезпечення екологічної безпеки є правова фіксація порушень, яка в умовах війни трансформується у цифрову площину. Головним викликом сьогодні є формування юридично значущої доказової бази, здатної витримати суворі процесуальні вимоги міжнародних інстанцій, включаючи Міжнародний кримінальний суд. Оскільки класичні акти огляду територій часто недоступні через замінування чи окупацію, ключову роль відіграє технологія Remote Sensing. Використання радарних даних (SAR) та оптичних супутників систем Sentinel і Landsat дозволяє в автоматичному режимі детектувати вирви від вибухів, розливи нафтопродуктів та деградацію рослинного покриву [2]. Інформаційні технології забезпечують створення часових серій (таймлапсів) руйнувань із точною геоприв'язкою, що робить докази об'єктивними та незалежними від людського фактора. Для гарантування незмінності цих даних критично важливим є впровадження технології блокчейн [3]. Захищені реєстри, такі як платформа «ЕкоЗагроза», інтегровані з блокчейн-протоколами, дозволяють верифікувати автентичність кожного цифрового доказу від моменту його отримання до представлення в суді, що знімає питання про можливість маніпуляції інформацією.

Перехід від правової фіксації до практичного аналізу вимагає модернізації машинно-технічного інструментарію. У контексті війни техніка виступає одночасно і джерелом забруднення у вигляді залишків знищеної бронетехніки, і засобом його подолання. Тона брукхту, що містить вибухові речовини та важкі метали, потребують дистанційного сканування. Тут на перший план виходять безпілотні літальні апарати (БПЛА) та автономні роботизовані комплекси. Оснащені мультиспектральними камерами, лідарами та газоаналізаторами, вони здатні проводити глибокий хімічний аналіз ґрунтів та атмосферного повітря без ризику для персоналу. У поєднанні з розгалуженими мережами IoT-сенсорів, що розгортаються навколо об'єктів критичної інфраструктури, ці технічні засоби формують потік даних у реальному часі. Для територій із повністю зруйнованою інфраструктурою найбільш ефективним рішенням є створення «цифрових двійників» (Digital Twins) [4]. Моделювання гідрологічних та атмосферних процесів на таких моделях дозволяє прогнозувати поширення забруднюючих

речовин у річкових басейнах, що є критичним для забезпечення питною водою цілих регіонів та планування стійких екосистемних рішень у майбутньому.

Економічний аспект екологічної безпеки безпосередньо залежить від точності отриманих технічних даних, оскільки правова фіксація злочину є лише першим кроком до залучення фінансування. Основна проблема полягає у складності об'єктивної монетизації втрачених екосистемних послуг. Інформаційні технології дозволяють автоматизувати методики розрахунку збитків, інтегруючи супутникові дані безпосередньо у фінансові алгоритми. Штучний інтелект здатний аналізувати площі знищених лісових масивів, враховуючи бонітет насаджень, їхній вік та втрачений потенціал депонування вуглецю, що дозволяє виставляти верифіковані рахунки агресору. Окрім репарацій, цифровізація відкриває шлях до «зелених» інвестицій через створення прозорих маркетплейсів екологічних проєктів. На таких платформах деокуповані громади можуть розмішувати плани рекультивації територій, підкріплені точними даними моніторингу. Для банківського та страхового сектору використання геоінформаційних систем (ГІС) для картування ризиків воєнного походження стає необхідною умовою для страхування агробізнесу та оцінки вартості земельних активів. Міжнародні донори потребують впевненості, що кошти спрямовуються на конкретні, цифрово верифіковані об'єкти, що робить ІТ-інструменти запобіжником проти неефективного використання ресурсів.

Управлінська вертикаль у цій системі вимагає переходу до моделі прийняття рішень на основі даних (Data-Driven Decisions) [5]. На сьогодні головною перешкодою є наявність «інформаційних силосів» – ситуації, коли Міндіквілля, Міноборони та ДСНС володіють фрагментарними даними, які не об'єднані у загальну картину. Виходом є створення Єдиної національної екологічної ГІС-платформи, яка стане головним управлінським інструментом держави. Системи підтримки прийняття рішень (DSS) на базі штучного інтелекту зможуть обробляти тисячі інформаційних шарів, пропонуючи оперативні сценарії ліквідації надзвичайних ситуацій (з урахуванням метеорологічних умов та рельєфу) та стратегічні плани рекультивації. Важливо розуміти, які землі слід пріоритетно розмінювати для сільського господарства, а які – доцільніше законсервувати під природно-заповідний фонд через надвисокий рівень хімічного забруднення. Візуалізація цих показників на інтерактивних панелях моніторингу (Dashboards) забезпечить уряду та органам місцевої влади можливість реагувати в режимі реального часу, долаючи бюрократичні бар'єри та забезпечуючи міжвідомчу синергію.

Інтеграція зазначених галузей через єдину цифрову платформу створює синергетичний ефект, де ІТ виконує роль сполучного матеріалу між правом, технікою, фінансами та управлінням. Цей замкнений цикл починається з правової фіксації супутникового знімка злочину, продовжується технічною верифікацією забруднення за допомогою дрона, переходить у фінансову площину через автоматизований розрахунок збитків алгоритмом і завершується управлінським рішенням про виділення бюджету на рекультивацію. Такий підхід робить екологічну політику прозорою, науково обґрунтованою та стійкою до зовнішніх викликів. Більше того, він відповідає міжнародним вимогам, зокрема механізмам СВАН та стандартам ESG, що є критично важливим для євроінтеграції України. Використання англійської мови як мови метаданих та програмного коду в цих системах забезпечує безперешкодний обмін інформацією з міжнародними партнерами та науковою спільнотою в реальному часі [6].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що в умовах сучасної війни інформаційні технології перестають бути допоміжним інструментом і стають критичною основою забезпечення екологічної безпеки. Створення Єдиної національної ГІС-платформи моніторингу доквілля має стати державним пріоритетом, що дозволить не лише дистанційно фіксувати злочини проти природи, а й закласти науковий фундамент для повоєнного відновлення. Легітимізація цифрових даних у міжнародному правовому полі є ключем до отримання репарацій та притягнення винних до відповідальності за екоцид. Відбудова України має базуватися на принципах «Build Back Smarter» – з використанням цифрових двійників територій та ІІІ-моделювання, що дозволить створити нову, екологічно безпечну та технологічно розвинену державу. Синергія новітніх ІТ-рішень та комплексного підходу до

управління ресурсами є єдиним шляхом до сталого майбутнього у глобальному екологічному просторі.

1. United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). *The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review*. Режим доступу: <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review> (дата звернення 23.04.2026).
2. European Space Agency (ESA). (2023). Copernicus services in support of EU External Action. Режим доступу: <https://www.european-space-act.com/Copernicus.html> (дата звернення 23.04.2026).
3. World Bank. (2020). Blockchain 2.0: Smart Contracts and Legal Records. Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/346083064\\_Blockchain\\_20\\_Smart\\_contracts](https://www.researchgate.net/publication/346083064_Blockchain_20_Smart_contracts) (дата звернення 23.04.2026).
4. Fuller, A., et al. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9103025> (дата звернення 23.04.2026).
5. OECD. (2019). The Path to Becoming a Data-Driven Public Sector. Режим доступу: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/11/the-path-to-becoming-a-data-driven-public-sector\\_9ed7e867/059814a7-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/11/the-path-to-becoming-a-data-driven-public-sector_9ed7e867/059814a7-en.pdf) (дата звернення 23.04.2026).
6. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. Режим доступу: <https://compass27.info/reglament-yes-2023-956-yevropejskogo-parlamentu-ta-rady-vid-10-travnya-2023-roku-pro-vstanovlennya-mehanizmu-vugleczevogo-koryguvannya-importu/> (дата звернення 23.04.2026).

**Баран Мар'яна**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**  
**Мокрицька Христина**  
**Національний університет «Одеська юридична академія»**

## **ТЕХНОЛОГІЧНА КОНВЕРГЕНЦІЯ ТА ЦИФРОВИЙ СУВЕРЕНІТЕТ ДОВКІЛЛЯ: СТРАТЕГІЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОЇ АГРЕСІЇ**

Сучасний стан глобальної безпеки та критична деградація природних екосистем внаслідок збройних конфліктів зумовлюють необхідність перегляду класичних доктрин екологічного права та моніторингу. Повномасштабна війна в Україні не лише спричинила безпрецедентний за масштабами екоцид, а й виявила інституційну слабкість традиційних методів контролю, що базувалися на аналогових принципах збору даних. Актуальність даного дослідження полягає у переході до нової парадигми – «машиночитаного» екологічного права, де інформаційні технології виступають не просто допоміжним засобом, а фундаментом для забезпечення національного суверенітету та міжнародної відповідальності агресора [1]. Метою тез є обґрунтування концепції інтегрованої цифрової екосистеми, яка через синергію права, ІТ-інженерії та фінансових інструментів забезпечує прозоре повоєнне відновлення та гармонізацію з «зеленим» курсом Європейського Союзу.

Центральним викликом у сфері екологічної безпеки під час війни є трансформація доказової бази воєнних злочинів із фізичної у цифрову площину. Оскільки доступ до окупованих або замінованих територій для фізичного відбору проб є неможливим, супутниковий моніторинг із використанням оптичних та радіолокаційних даних (SAR) стає безальтернативним стандартом. Проте наукова та юридична новизна сьогодні полягає у створенні «ланцюжка довіри» для цифрових знімків. Це передбачає впровадження

криптографічних протоколів та блокчейн-реєстрів, які дозволяють зафіксувати метадані кожного кадру безпосередньо в момент отримання сигналу із супутника [2]. Такий підхід перетворює дистанційне зондування на джерело юридично неспростовних доказів екоциду, що є критичним для майбутніх процесів у міжнародних трибуналах. Автоматизація збору даних через платформи типу «ЕкоЗагроза» дозволяє не лише накопичувати інформацію, а й за допомогою методів машинного навчання відокремлювати фонове забруднення від цілеспрямованого нищення критичної інфраструктури, що забезпечує точність кваліфікації злочину за Римським статутом.

Розвиток апаратно-технічного забезпечення моніторингу вимагає інтеграції безпілотних систем та сенсорних мереж у єдиний інтелектуальний простір. У зонах конфлікту техніка стає «очима» еколога: БПЛА, оснащені лідарами та газоаналізаторами, проводять дистанційну верифікацію забруднень, передаючи дані в реальному часі до централізованих баз. Науковий інтерес викликає застосування концепції «цифрових двійників» територій (Digital Twins) [3], які дозволяють моделювати динаміку поширення забруднюючих речовин у складних ландшафтних умовах. Створення таких моделей є основою для планування стійких очисних споруд та рекультивації ґрунтів, оскільки дозволяє прогнозувати екологічні ризики на десятиліття вперед. Проте впровадження таких систем вимагає вирішення проблеми кіберзахисту сенсорних мереж та забезпечення їхньої автономності в умовах радіоелектронної боротьби, що робить екологічний моніторинг частиною загальної стратегії кібербезпеки держави.

Юридична та економічна інтеграція України до європейського простору неможлива без впровадження стандарту Legal Tech у сфері екологічного нагляду. Перехід до систем автоматичного моніторингу викидів (CEMS) змінює саму природу правопорушення: воно фіксується не під час перевірки інспектором, а безперервно алгоритмом. Це потребує повної цифровізації нормативних актів, де автоматичні сповіщення систем набувають статусу юридичного факту. Ключовим елементом «зеленої» трансформації стають цифрові паспорти продуктів (Digital Product Passports), які на основі технологій QR-кодування та блокчейну забезпечують прозорість вуглецевого сліду товару на всьому життєвому циклі. Для прискорення адаптації українського законодавства до вимог Директиви про промислові викиди та інших актів ЄС доцільно використовувати інструменти Natural Language Processing (NLP), що дозволяють проводити автоматизований порівняльний аналіз правових норм, забезпечуючи їх технічну та змістовну сумісність [4].

Фінансовий вимір екологічної безпеки сьогодні базується на точності монетизації збитків через складні IT-системи. Механізм транскордонного вуглецевого регулювання (СВАМ) стає для українських підприємств не лише економічним викликом, а й стимулом для розгортання високотехнологічного обліку викидів. У цьому контексті використання англійської мови як мови метаданих та міжнародних стандартів звітності є критичним для успішної верифікації даних перед європейськими регуляторами. Новітнім інструментом превентивного екологічного менеджменту стають смарт-контракти, інтегровані з IoT-датчиками. За такої схеми будь-яке зафіксоване перевищення лімітів забруднення автоматично запускає фінансові транзакції з компенсації збитків, що робить екологічну відповідальність невідворотною та вільною від корупційних впливів. Крім того, семантичний аналіз корпоративної звітності дозволяє ефективно виявляти «грінвошинг», забезпечуючи справедливую конкуренцію та залучення реальних «зелених» інвестицій у відновлення України.

Ефективне державне управління в умовах невизначеності вимагає переходу до моделі Data-Driven Decisions, де пріоритетом стає подолання відомчої розрізненості інформації. Створення Єдиної національної екологічної ГІС-платформи повинно об'єднати дані військових, цивільних та приватних джерел у єдиний аналітичний шар. Системи підтримки прийняття рішень (DSS) на базі штучного інтелекту дозволяють математично обґрунтовувати пріоритетність розмінування чи рекультивації територій, базуючись на аналізі великих масивів даних про стан ґрунтів та підземних вод. Це особливо важливо для реалізації права громадян на безпечне довкілля та доступ до інформації, згідно з нормами Орхуської конвенції. Візуалізація складних екологічних показників на інтерактивних панелях (Dashboards) дає можливість

оперативно оцінювати прогрес відновлення та приймати рішення про повернення земель у господарський обіг чи їх консервацію для збереження біорізноманіття.

Кібербезпека екологічних даних стає невід'ємною частиною національної стійкості, оскільки інформація про ресурси та стан довкілля може бути об'єктом маніпуляцій з боку агресора. Забезпечення легітимності висновків штучного інтелекту в органах державної влади, особливо при проведенні оцінки впливу на довкілля (ОВД), вимагає розробки нових правових регламентів. Інтероперабельність українських цифрових систем із європейською мережею EIONET є стратегічним кроком, що закріплює Україну як суб'єкта формування глобальної екологічної політики. Така інтеграція дозволяє обмінюватися даними моніторингу в реальному часі, що підвищує загальний рівень безпеки всього європейського континенту та створює умови для впровадження спільних стандартів «зеленого» цифрового переходу.

На завершення слід зазначити, що майбутнє екологічної безпеки України лежить у площині тотальної цифрової конвергенції права та технологій. Тільки через законодавче закріплення статусу цифрових даних як первинних доказів та впровадження принципів «Build Back Smarter» Україна зможе побудувати стійку та прозору модель еколого-економічного розвитку. Використання блокчейну для захисту реєстрів, штучного інтелекту для моделювання відновлення та супутникових технологій для фіксації порушень формує надійний щит екологічного суверенітету. Синергія цих інструментів дозволить не лише ефективно ліквідувати наслідки війни та отримати справедливі репарації за екоцид, а й трансформувати Україну в інноваційного лідера «зеленої» цифровізації в Європі. Повоєнна відбудова має стати не просто процесом фізичного відновлення, а актом створення нової, інтелектуальної та екологічно безпечної держави, інтегрованої в глобальний цифровий простір.

1. Ashley, K. D. (2017). *Artificial intelligence and legal analytics: New tools for law practice in the digital age*. Cambridge University Press.  
[https://assets.cambridge.org/97811071/71503/frontmatter/9781107171503\\_frontmatter.pdf](https://assets.cambridge.org/97811071/71503/frontmatter/9781107171503_frontmatter.pdf)

2. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* (pp. 85–113). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)

3. Hofman, D. (2021). The chain of custody: Blockchain and the digital permanence of evidence. *Journal of Digital Forensics*.  
[https://www.researchgate.net/publication/332594361\\_Blockchain\\_for\\_Modern\\_Digital\\_Forensics\\_The\\_Chain-of-Custody\\_as\\_a\\_Distributed\\_Ledger](https://www.researchgate.net/publication/332594361_Blockchain_for_Modern_Digital_Forensics_The_Chain-of-Custody_as_a_Distributed_Ledger)

4. Susskind, R. (2019). *Online courts and the future of justice*. Oxford University Press.  
<https://scispace.com/pdf/online-courts-and-the-future-of-justice-susskind-r-e-3c7rrhu5xm.pdf>

**Баран Мар'яна**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**  
**Квас Ольга**  
**Стрийський ліцей №6**

## **СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ХЕМОДИНАМІКА ВОЄННОГО ЕКОЦИДУ: КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ДЕГРАДАЦІЇ ЕКОСИСТЕМ ЧЕРЕЗ ІНТЕГРОВАНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ**

Сучасна оцінка екологічної безпеки в умовах інтенсивних збройних конфліктів вимагає переходу від описової констатації руйнувань до суворих кількісних методів аналізу хемодинаміки забруднюючих речовин. Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю формалізації процесів поширення токсикантів воєнного походження,

детермінованих масовим викидом продуктів детонації, піролізу та неконтрольованої дифузії агресивних хімічних агентів. Традиційний моніторинг довкілля, обмежений епізодичними вимірюваннями, не здатний відобразити нелінійний характер міграції важких металів та стійких органічних забруднювачів у гетерогенних середовищах. Метою роботи є розробка методологічного підходу, що поєднує інструменти математичного моделювання дифузійно-адвективних процесів із високоточними даними аналітичної хімії, що дозволяє верифікувати стан екологічної безпеки територій як динамічну систему з високим ступенем ентропії.

В основі аналізу воєнного екоциду лежить розуміння хімічної природи вибухових речовин та продуктів їхньої трансформації в ґрунтовому розчині. Детонація боєприпасів спричиняє миттєвий викид нітроароматичних сполук, таких як тринітротолуол (ТНТ) та гексоген, які піддаються фотохімічному та мікробному розкладанню з утворенням вторинних токсикантів. Математична формалізація цих процесів вимагає застосування рівнянь хімічної кінетики першого та другого порядків для опису констант швидкості деградації в залежності від температури, вологості та рН середовища [1]. Оцінка ризиків у цьому контексті зміщується від простого виявлення речовини до прогнозування її біодоступності, що визначається коефіцієнтами сорбції та десорбції в системі «ґрунт – підземні води». Використання інформаційних технологій дозволяє розв'язувати системи диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описують масоперенос у пористих середовищах, забезпечуючи точну локалізацію геохімічних аномалій навіть за відсутності прямих замірів на замінованих територіях.

Геометричний аналіз воронок від вибухів, отриманий за допомогою дистанційного зондування з високою роздільною здатністю, виступає вхідним параметром для розрахунку енергетичного впливу на ґрунтовий покрив. З точки зору математичної морфології, кожна воронка є точковим джерелом інтенсивної міграції важких металів – свинцю, сурми, міді та марганцю, що входять до складу детонаторів та оболонок снарядів. Застосування стохастичних моделей, зокрема методів Монте-Карло, дозволяє врахувати варіативність розподілу уламків та продуктів згоряння порохів у межах епіцентру вибуху [2]. Інтеграція цих даних у геоінформаційні системи (ГІС) дає можливість будувати імовірнісні карти забруднення, де кожна комірка растру містить статистично обґрунтований прогноз концентрації токсикантів. Це дозволяє уникнути помилок інтерполяції, характерних для стандартних методів кригінгу, та забезпечує вищу точність оцінки екологічної безпеки в умовах обмеженої вибірки даних.

Особливу складність для моделювання становлять гідрохімічні процеси у басейнах річок, що зазнали транскордонного впливу внаслідок руйнування промислових об'єктів. Хімік-аналітик розглядає річкову систему як реактор витіснення з розподіленими параметрами, де відбуваються процеси седиментації, адсорбції на зважених частках та біоаккумуляції. Математичний апарат гідродинаміки, зокрема рівняння Нав'є-Стокса, поєднаний із модулями хімічних перетворень, дозволяє прогнозувати рух «токсичного фронту» після техногенних катастроф, спричинених обстрілами. Інформаційні технології забезпечують обробку великих масивів даних (Big Data) з датчиків реального часу, інтегрованих у вузли екологічного моніторингу. Застосування методів нейронних мереж для аналізу спектроскопічних даних дозволяє автоматично ідентифікувати специфічні маркери забруднення, що характерні саме для воєнної техніки, відокремлюючи їх від фонових промислового навантаження регіону.

Економічна оцінка воєнних збитків у такому підході базується на концепції втраченої вільної енергії екосистеми та термодинамічного балансу. Збитки довкіл्लю розглядаються як збільшення ентропії системи, що потребує значних енергетичних та фінансових витрат для повернення до стабільного стану. Математичне моделювання дозволяє розрахувати обсяг необхідних ресурсів для рекультивації, виходячи з термодинамічної ймовірності сорбційних процесів. Це створює об'єктивну базу для еколого-економічної експертизи, де кожна гривня збитків підкріплена розрахунком маси перенесеної речовини та площі деградованих біоценозів. Такий підхід робить оцінку збитків неспростовною з погляду фундаментальної науки, що є вирішальним при розгляді позовів у міжнародних інституціях, де аргументи мають базуватися на верифікованих кількісних закономірностях.

Управлінський аспект екологічної безпеки в межах даної парадигми трансформується у задачу багатокритеріальної оптимізації. Використання методів дослідження операцій дозволяє знаходити раціональні стратегії відновлення територій за умов обмеженого бюджету та часу. Штучний інтелект виступає як інструмент підтримки прийняття рішень, який на основі навчених моделей прогнозує ефективність різних сценаріїв ремедіації – від фіторемедіації (використання рослин-аккумуляторів) до хімічної інактивації важких металів у ґрунті. Важливою умовою є дотримання кібербезпеки всього обчислювального ланцюга, оскільки вихідні дані про хімічний склад ґрунтів та підземних горизонтів є об'єктом стратегічного значення. Інтеграція цих результатів у європейську цифрову екосистему моніторингу вимагає уніфікації одиниць вимірювання та методів статистичної обробки інформації відповідно до стандартів ISO та вимог EIONET.

Отже, забезпечення безпеки довкілля в умовах війни вимагає синтезу фундаментальних знань про хімізм процесів та потужних обчислювальних алгоритмів. Цифровізація екологічного моніторингу через призму математичного моделювання дозволяє вийти за межі суб'єктивних оцінок, надаючи державі точний інструмент фіксації екоциду. Створення інтегрованих інтелектуальних систем, здатних оперувати рівняннями масопереносу та стохастичними методами аналізу, є запорукою не лише успішного подолання наслідків агресії, а й формування нової інтелектуальної бази для сталого розвитку України. Повоєнна відбудова, заснована на строгих математичних розрахунках та глибокому хімічному аналізі, забезпечить створення стійкої, екологічно безпечної держави, здатної захистити свій природний капітал у глобалізованому світі за допомогою найвищих технологічних стандартів.

1. Sparks, D. L. (2003). *Environmental soil chemistry*. Academic Press. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2593290>
2. Zheng, C., & Bennett, G. D. (2002). *Applied contaminant transport modeling*. Wiley. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2874429>

**Барна Остап, Петрушка Ігор**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**

## **ВПЛИВ ІОНІВ КАДМІЮ НА ҐРУНТОВЕ СЕРЕДОВИЩЕ**

У тезах розглянуто проблему забруднення ґрунтового середовища іонами кадмію як одного з найбільш токсичних важких металів антропогенного походження. Проаналізовано основні джерела надходження кадмію до ґрунтів, особливості його міграції, акумуляції та трансформації у ґрунтовому профілі [1-3]. Встановлено негативний вплив кадмію на фізико-хімічні властивості ґрунтів, мікробіологічну активність, родючість та екологічну безпеку агроландшафтів. Показано, що іони кадмію характеризуються високою мобільністю у кислих ґрунтах та здатністю до біоаккумуляції в рослинах, що створює ризики для харчових ланцюгів і здоров'я населення. Наведено сучасні підходи до моніторингу, оцінювання ризику та ремедіації забруднених ґрунтів.

Серед сучасних екологічних проблем значне місце займає забруднення ґрунтів важкими металами. Особливо небезпечним є кадмій (Cd), який належить до I класу небезпеки та характеризується високою токсичністю навіть за низьких концентрацій. На відміну від органічних забруднювачів, кадмій не руйнується природним шляхом і може тривалий час зберігатися в ґрунті, змінюючи його екологічний стан.

Основними джерелами надходження кадмію до ґрунтів є металургійна промисловість, спалювання палива, використання фосфатних добрив, стічні води, відвали промислових підприємств, транспортні викиди, а також наслідки військових дій. У районах бойових дій

забруднення кадмієм може посилюватися внаслідок руйнування промислових об'єктів, вибухів боєприпасів та пожеж.

У ґрунтовому середовищі кадмій перебуває у різних формах: у розчиненому стані в ґрунтовому розчині; у сорбованому стані на поверхні глинистих мінералів; у зв'язаному стані з гумусовими речовинами; у складі карбонатів, оксидів Fe та Mn; у залишкових малорозчинних сполуках.

Найбільшу екологічну небезпеку становить рухома форма кадмію, яка легко засвоюється рослинами та мігрує у водне середовище.

Надлишок іонів кадмію змінює хімічну рівновагу ґрунту та впливає на його буферні властивості. Встановлено, що кадмій: пригнічує катіонний обмін; витісняє кальцій, магній та цинк із ґрунтового вбирного комплексу; змінює кислотність середовища; знижує активність ферментативних процесів [4-6]. У кислих ґрунтах ( $\text{pH} < 6$ ) рухомість кадмію суттєво зростає, що підвищує ризик його переходу у рослини.

Кадмій негативно впливає на ґрунтові мікроорганізми, які забезпечують процеси гумусоутворення, мінералізації органічних речовин та кругообігу азоту. За підвищених концентрацій спостерігається: зменшення чисельності бактерій та грибів; пригнічення азотфіксуючих мікроорганізмів; зниження активності дегідрогенази, уреазы та каталази; порушення структури мікробного ценозу.

Це призводить до зниження біологічної активності ґрунту та погіршення його родючості.

Іони кадмію легко поглинаються кореневою системою рослин. Найчастіше накопичення відбувається у коренях, листках та зерні. Наслідки дії кадмію: пригнічення проростання насіння; зменшення довжини коренів; хлороз листків; порушення фотосинтезу; зниження урожайності.

Особливо небезпечним є накопичення кадмію в овочах, зернових культурах та кормових рослинах.

Кадмій здатний передаватися по харчовому ланцюгу: ґрунт → рослина → тварина → людина. Тривале надходження кадмію до організму людини може викликати ураження нирок, кісткової тканини, печінки та нервової системи.

Для оцінювання ризику використовують: коефіцієнт забруднення (CF); індекс геоаккумуляції (Igeo); інтегральний індекс ризику Hakanson; коефіцієнт біоаккумуляції.

Для зменшення негативного впливу кадмію застосовують: вапнування ґрунтів – знижує рухомість  $\text{Cd}^{2+}$ ; внесення органічної речовини – торф, компост, біочар; фіторе mediaцію – використання рослин-аккумуляторів; сорбенти – цеоліти, бентоніти, активоване вугілля; біоре mediaція – використання мікроорганізмів-деструкторів [7-8].

Найефективнішим вважається комплексний підхід із поєднанням агрохімічних та біотехнологічних методів.

Таким чином іони кадмію є одним із найбільш небезпечних забруднювачів ґрунтового середовища через високу токсичність, мобільність та здатність до біоаккумуляції. Забруднення кадмієм призводить до порушення фізико-хімічних і біологічних властивостей ґрунту, пригнічення мікробіоти, зниження врожайності та погіршення екологічної безпеки територій. Особливу актуальність проблема має для України в умовах воєнного навантаження на довкілля. Ефективне управління ризиками потребує системного моніторингу, оцінки ступеня забруднення та впровадження сучасних технологій ремедіації.

1. Волошин, І., & Омельченко, О. (2013). Особливості акумуляції важких металів урбаноземами м. Львова. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*, 44, 73–82.

2. Гумницький, Я. М., Сабадаш, В. В., & Тижбір, Г. А. (2008). Міграція важких металів у ґрунтовому середовищі. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 609, 211–213.

3. Кошарна, С., & Коржнев, М. (2025). Важкі метали на техногенних об'єктах гірничо-збагачувальних комбінатів Криворізького басейну. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(81), 92–97.

4. Кураєва, І. В., & Сплодитель, А. О. (2020). Акумуляція та перерозподіл важких металів у сучасному ґрунтовому покриві природоохоронних територій. *Геологічний журнал*, 1, 45–56.

5. Кураєва, І. В., Кошлякова, Т. О., Дерюгіна, О. В., Азімов, О. Т., Лемеш, Л. В., & Швайка, І. А. (2025). Особливості забруднення ґрунтів важкими металами в результаті бойових дій. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*, 2(47).

6. Самохвалова, В. Л., Фатєєв, А. І., & Найдьонова, О. Є. (2008). Аналіз стану забруднених важкими металами ґрунтів за окремими біохімічними показниками. *Науковий вісник Ужгородського університету*.

7. Савосько, В. (2019). Поширення педогеохімічних бар'єрів міграції важких металів у ґрунтовому профілі чорноземів Криворіжжя. *Біологічні системи*, 11(2), 243–252.

8. Троїцький, М. О., & Дмитрієва, Л. А. (2015). Міграція важких металів у ланці «ґрунт–рослини» в агроландшафтах Степу України. *Наукові праці. Екологія*.

**Білошапка Вікторія**  
*Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана*

## **ПІДХОДИ ДО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ЯК СВІТОГЛЯДНА ПРОБЛЕМА СУСПІЛЬСТВА: ВИКЛИКИ СУЧАСНОСТІ**

Перехід суспільства до технологічного способу виробництва, пов'язаний з науково-технічною революцією, яка багаторазово помножила всі можливості людини, спричинивши істотні зміни у ставленні людини до природи. Людина видозмінює природу і що пристосовує її для задоволення своїх потреб. Характерною рисою ранніх етапів науково-технічної революції було ігнорування законів природи, що спричинило конфліктні форми взаємодії двох мегасистем: суспільства та природи. Тому погіршилась екологічна ситуація, а проблеми охорони навколишнього середовища наразі вже розглядаються на світовому рівні, оскільки збереження природно-ресурсного потенціалу є основною умовою для сталого соціально-економічного розвитку суспільства.

Головною метою охорони навколишнього середовища є зрештою встановлення гармонії між розвитком людства та сприятливим станом навколишнього середовища. Досягнення цієї мети в теоретичному аспекті вимагає відповіді на низку складних питань, таких як:

1) наскільки зміни якості довкілля, що відбуваються під впливом розвитку людства, загрожують фізичному існуванню самого людства;

2) чи здатні люди запобігти настанню екологічної кризи;

3) що необхідно зробити, щоб вирішити проблему охорони навколишнього середовища, гарантувати право людини на сприятливе довкілля?

Природа не визнає державних та адміністративних кордонів, і зусилля однієї чи кількох держав не можуть запобігти екологічній кризі та дати відчутних результатів у цій галузі. Розуміння цих процесів диктує тенденції та принципи природокористування.

Проблеми зміни клімату, деградації навколишнього середовища та зниження біорізноманіття все більше турбують світове співтовариство, що знаходить свій відбиток й у міжнародному праві. До основних міжнародно-правових джерел у галузі охорони навколишнього середовища належать міжнародні конвенції, договори, угоди, резолюції та документи міжнародних організацій щодо охорони навколишнього середовища та раціонального використання природних ресурсів. Найважливіше місце відводиться резолюціям Генеральної Асамблеї ООН.

Наразі, в умовах повномасштабного вторгнення росії, умисна і ненавмисна руйнація довкілля є характерною рисою війни. Довкілля дедалі частіше стає як ландшафтом бойових дій, так і їх причиною і метою. Змінюються і самі озброєні зіткнення. Місце міждержавних війн

минулого дедалі частіше займають внутрішньодержавні конфлікти та військові операції проти недержавних суб'єктів. Нарешті, розвиток військових технологій призводить до того, що екологічні збитки, завдані під час конфліктів, настільки значні, що загрожують катастрофічними наслідками для цілих народів.

Фахівці вже сьогодні зазначають, що несприятливі екологічні наслідки, спричинені воєнними діями на території України, можуть мати місце ще багато десятиліть. До несприятливих екологічних наслідків, зокрема, для жителів Донбасу віднесено руйнування промислових підприємств і очисних споруд, що спричинили багатотонні надходження забруднюючих речовин в об'єкти довкілля – атмосферне повітря, прісну воду, ґрунт; викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря та попадання важких металів у ґрунт при розривах снарядів; спровоковані лісові та степові пожежі.

Тотальна екологічна деградація територій є одним із складних і довгострокових наслідків сучасних збройних конфліктів. В цьому сенсі важливо розуміти, що природа та суспільство не просто співіснують, а становлять єдину систему, елементи якої активно впливають один на одного.

Питання про застосовність міжнародного екологічного права в ситуаціях бойових дій та військової окупації в останні роки привернуло значну увагу вчених. Загальновизнаним є те, що сам собою стан війни автоматично не тягне за собою припинення дії міжнародних договорів, укладених сторонами конфлікту [1]. Разом з тим, філософський підхід до природокористування відображає насамперед світоглядну проблему суспільства, оскільки природа на рівні підсвідомості сприймається людьми як об'єкт маніпулювання, а заходи щодо її збереження пов'язані з усвідомленням необхідності використання природних благ майбутніми поколіннями.

Доволі складно визначити прямі зобов'язання у сфері прав людини, що діють у зонах воєнних конфліктів [2]. Крім того, можливі ситуації, коли різні права вступають у конфлікт один з одним (наприклад, право на воду та право недоторканності приватної власності). У таких ситуаціях необхідність балансування призведе до того, що екологічними міркуваннями буде пожертвовано на користь інших цінностей. Тим більше що екологічне право ґрунтується на колективістському підході до природи як до загального надбання людства, тоді як суди, застосовуючи права людини, завжди спираються на індивідуалістичний підхід.

Однак допоки збройні сили країн конфлікту не демонструють на практиці раціональність щодо забруднення навколишнього середовища, а міжнародна напруженість лише наростає, каталізуючи ризики нових збройних конфліктів на тлі ослаблення міжнародного права та міжнародних інститутів та їхньої нездатності виконувати як миротворчі, так і природоохоронні функції, можна з очевидністю сказати, що сьогодні превалювання військових інтересів над екологічними збережеться і, можливо, навіть відчутно посилиться.

Загальними висновками автор представляє наступні:

- 1) у міру розвитку цивілізації та технічного прогресу обсяги екологічних наслідків воєн та військових конфліктів зростали;
- 2) географія військових конфліктів в даний час розширюється, що неминуче призводить до екологічних катастроф локального та регіонального масштабу;
- 3) екологічні наслідки збройних конфліктів поділяються на прямі та непрямі, які розрізняються за масштабністю та тривалістю негативного впливу;
- 4) найбільш небезпечним та довготривалим негативним ефектом для природного середовища та, відповідно, життєдіяльності людини, є застосування зброї масового ураження – ядерної, хімічної та біологічної;
- 5) в даний час викликає побоювання створення кліматичної зброї, що штучно викликає техногенні катастрофи;
- 6) міркування національної та міжнародної безпеки, очевидно, превалюють над інтересами захисту навколишнього середовища та раціонального природокористування.

1. Cusato, E. (2021). *The ecology of war and peace: marginalising slow and structural violence in international law*. Cambridge: Cambridge Univ. Press.

2. Smith, T. (2022). *The protection of the environment and natural resources in armed conflict*. International conflict and security law: A research handbook. Berlin: Springer.

Бузіна Ірина  
Державний біотехнологічний університет

## ГІС-АНАЛІЗ ДЕГРАДАЦІЇ АГРОЛАНДШАФТІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ В УМОВАХ ВІЙНИ

Повномасштабна війна в Україні спричинила безпрецедентні та глибокі трансформації природного середовища, які мають довготривалий, комплексний і багатовекторний характер. Україна історично відіграє роль одного з ключових гарантів світової продовольчої безпеки, тому руйнування її аграрного потенціалу має глобальні наслідки. Одним із найбільш уразливих елементів цієї системи є агроландшафти, зокрема унікальні лісостепові екосистеми, що формують основу сільськогосподарського виробництва держави. У результаті інтенсивних бойових дій вони зазнають не лише прямого фізичного руйнування, але й складних деградаційних змін, які охоплюють ґрунтовий покрив, гідрологічний режим, рослинність та складні екосистемні зв'язки. Вплив війни на аграрні системи України є настільки масштабним, що потребує негайного впровадження нових підходів до оцінки збитків.

У сучасних умовах питання системної оцінки цих змін і визначення науково обґрунтованих шляхів відновлення набуває особливої актуальності. Від цього залежить не лише екологічний стан і резильєнтність територій, а й можливість їх безпечного та економічно доцільного подальшого господарського використання. Метою цього дослідження є комплексний аналіз просторових патернів деградації агроландшафтів з використанням сучасних геоінформаційних технологій та розробка багаторівневої стратегії їх рекультивациї.

Оцінка екологічних наслідків конфлікту вимагає залучення широкого спектра аналітичних даних. Попередній огляд екологічних наслідків конфлікту вказує на критичне забруднення ґрунтів та водних ресурсів у зонах активних бойових дій. Водночас швидка оцінка завданої шкоди та потреб на відновлення України підтверджує, що аграрний сектор зазнав колосальних інфраструктурних та земельних втрат.

Особливість дослідження агроландшафтів у воєнний та поствоєнний періоди полягає у значних і часто нездоланих обмеженнях фізичного доступу до територій. Величезні площі земель залишаються замінованими, забрудненими нерозірваними боєприпасами або перебувають у зоні високого ризику артилерійських обстрілів. Це суттєво ускладнює, а подекуди робить неможливим проведення традиційних польових ґрунтознавчих та екологічних експедицій. Така ситуація вимагає безальтернативного переходу до дистанційних методів аналізу.

### *Методологія ГІС-аналізу та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ)*

У контексті обмеженого доступу геоінформаційні системи та дані дистанційного зондування Землі виступають ключовими, а часто і єдиними інструментами, які дозволяють отримувати об'єктивну, верифіковану просторову інформацію про стан екосистем без безпосереднього контакту з ними. Сучасні європейські програми моніторингу поверхні суші забезпечують дослідників високоточними супутниковими знімками та інструментами для аналізу змін у землекористуванні. Дані з супутників серії Sentinel (зокрема Sentinel-2) дозволяють проводити багатоспектральний аналіз територій з високою просторовою та часовою роздільною здатністю.

ГІС-аналіз деградації агроландшафтів базується на глибокій інтеграції різних джерел просторових даних. Використання вегетаційних індексів (NDVI, SAVI, EVI) дає змогу швидко

ідентифікувати деградовані ділянки шляхом оцінки фотосинтетичної активності та біомаси рослинності. Поєднання мультиспектральних даних із цифровими моделями рельєфу (DEM) та оцифрованими картами ґрунтів дозволяє більш точно оцінювати причини, напрямки міграції забруднювачів та масштаби деградації.

Важливим компонентом методології є побудова концептуальної схеми комплексного радіоекологічного підходу до моніторингу, моделювання, нормування та радіобіологічної оцінки впливу іонізуючого випромінювання на біорізноманіття в лісостепових екосистемах. Оскільки під час бойових дій існує ризик пошкодження об'єктів критичної інфраструктури, що може призвести до радіаційного забруднення, інтеграція радіоекологічних шарів даних у загальну ГІС-модель стає обов'язковою умовою для всебічної оцінки безпеки агроландшафтів.

*Багатокомпонентний характер деградації ґрунтів:*

1. Механічна деградація та педотурбація. Деградація агроландшафтів унаслідок воєнних дій має складний багатокомпонентний характер. Найбільш очевидним і просторово вираженим її проявом є механічне руйнування ґрунтового покриву. Детонація артилерійських снарядів, мін та авіабомб призводить до викиду та переміщення тисяч тонн ґрунтової маси. Вибухи формують глибокі вирви, кардинально змінюють мікрорельєф, викликають так звану антропогенну педотурбацію – перемішування та знищення генетичних горизонтів ґрунту. Родючий гумусовий шар перемішується з материнською породою, що призводить до різкого падіння вмісту органічної речовини. У таких умовах орний шар фактично втрачає свою агрономічно цінну структуру, що унеможливорює його ефективне використання. Важливо підкреслити, що навіть після механічного вирівнювання території (засипання вирв) структура ґрунту залишається порушеною, що вимагає тривалих додаткових агротехнічних і біологічних заходів.

2. Фізичне ущільнення. Не менш значущим і прихованим фактором є критичне ущільнення ґрунтів, спричинене рухом та маневруванням важкої військової техніки (танків, бронетранспортерів, самохідних артилерійських установок). Гусенична техніка створює суттєвий тиск, який значно перевищує допустимі норми для сільськогосподарських угідь. Ущільнений ґрунт характеризується різко зниженою пористістю, зруйнованими капілярами, погіршеним водно-повітряним режимом і вкрай обмеженою здатністю до інфільтрації атмосферних опадів. Це призводить до посилення поверхневого стоку, розвитку водної ерозії, негативно впливає на розвиток кореневих систем рослин і катастрофічно знижує врожайність. Особливу небезпеку становить те, що так звана «плужна підошва», сформована військовою технікою, може зберігатися в профілі ґрунту протягом десятиліть навіть після припинення механічного навантаження.

3. Хімічне та радіаційне забруднення. Хімічне забруднення є одним із найскладніших і найнебезпечніших аспектів деградації агроландшафтів. У ґрунтах накопичуються важкі метали (свинець, кадмій, мідь, цинк, стронцій), залишки вибухових речовин (тротил, гексоген), продукти їх неповного згоряння, сполуки сірки, нафтопродукти та інші високотоксичні речовини. Їхня присутність не лише різко знижує біологічну активність і родючість ґрунтів, але й створює прямі ризики для здоров'я населення через транслокацію токсикантів і можливе потрапляння у харчові ланцюги. У зонах активних бойових дій рівень забруднення ґрунтів важкими металами може в десятки разів перевищувати гранично допустимі концентрації (ГДК), що потребує спеціалізованих і високовартісних заходів очищення. Крім того, необхідний постійний моніторинг радіаційного фону та оцінка можливого впливу іонізуючого випромінювання на мікробіоту ґрунту, що є критично важливим для підтримання стійкості лісостепових екосистем.

*Проблема оптоволоконних кабелів як нового антропогенного фактора*

Окремим, інноваційним та поки що недостатньо дослідженим фактором деградації агроландшафтів є наявність на поверхні ґрунту залишків військової інфраструктури, зокрема польових ліній зв'язку та оптоволоконних кабелів. У сучасній високотехнологічній війні активно використовуються дотові системи зв'язку, а також системи управління FPV-дронами та протитанковими ракетними комплексами (ПТРК), які прокладаються або розмотуються безпосередньо по поверхні землі, у лісосулах або на незначній глибині.

Після відходу військ, зміни лінії фронту або використання ударних дронів сотні кілометрів таких кабелів залишаються на сільськогосподарських полях, формуючи унікальний і вкрай небезпечний антропогенний фактор впливу. Проблема оптоволоконних кабелів має кілька вимірів:

- фізичні перешкоди. Кабелі створюють критичні перешкоди для обробітку ґрунту. Надмірна кевларова або полімерна оплітка оптоволокну намотується на робочі органи сільськогосподарської техніки (фрези, культиватори, сівалки), що призводить до їхнього заклинювання та дороговартісних поломок.

- екологічно-хімічний вплив. Полімерні оболонки кабелів під дією ультрафіолету та ґрунтових мікроорганізмів з часом починають руйнуватися, перетворюючись на мікропластик, що забруднює ґрунт. Крім того, кабелі можуть містити специфічні гідрофобні гелі та хімічні сполуки, які локально впливають на біохімію ґрунту.

- складність рекультивації. Їхня наявність ускладнює проведення саперних та рекультиваційних робіт. З точки зору ГІС-аналізу, проблема є винятково складною через відносно малу просторову виразність (товщину) кабелів на стандартних супутникових знімках.

Для вирішення цієї проблеми необхідне застосування надвисокодеталізованих аерофотознімків, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), оснащених мультиспектральними та тепловізійними камерами. Спеціальні алгоритми комп'ютерного зору здатні ідентифікувати лінійні об'єкти на поверхні ґрунту та створювати відповідні векторні шари даних у ГІС. Інтеграція цієї інформації дає змогу враховувати їх при плануванні безпечного маршруту техніки під час розмінування та рекультивації.

#### *Обґрунтування та етапи заходів рекультивації*

Практичні приклади з різних регіонів України (зокрема Київщини, Харківщини, Херсонщини) підтверджують ефективність просторового ГІС-підходу. Просторовий аналіз став безальтернативною основою для прийняття управлінських рішень щодо зонування та подальшого використання територій. Обґрунтування заходів рекультивації повинно базуватися виключно на результатах комплексного ГІС-радіоекологічного та едафічного аналізів. Процес відновлення необхідно розділити на кілька стратегічних етапів:

- технічна рекультивація. Для територій із механічними пошкодженнями першочерговим є гуманітарне розмінування, вилучення залишків НРБ та оптоволоконних кабелів (із застосуванням БПЛА-сканування), засипання вирв та планування поверхні.

- агротехнічна та біологічна рекультивація. Для ділянок із порушеною структурою та ущільненим ґрунтом необхідне глибоке рихлення (безвідвальний обробіток для руйнування плужної підшви) та посів багаторічних трав (фітомеліорантів) для відновлення гумусового шару.

- фіторе mediaція. У випадках хімічного забруднення важкими металами найбільш екологічним та доцільним є застосування методів фіторе mediaції – вирощування технічних культур (наприклад, технічних сортів соняшнику, ріпаку, гірчиці), які здатні акумулювати токсиканти у своїй біомасі з подальшою її безпечною утилізацією.

- екосистемний підхід. У разі критичної деградації, коли економічна доцільність повернення земель в рілля відсутня, обґрунтовується необхідність консервації земель – їх заліснення або переведення у статус природних пасовищ, що особливо важливо для збереження біорізноманіття лісостепових екосистем.

#### *Висновки*

Підсумовуючи, слід зазначити, що ефективність рекультиваційних заходів в умовах обмежених фінансових і технічних ресурсів значною мірою залежить від правильного визначення пріоритетів. ГІС-технології дозволяють ранжувати території за ступенем деградації, екологічними ризиками та економічною доцільністю відновлення.

Використання сучасних геоінформаційних систем у поєднанні з радіоекологічним та хімічним моніторингом забезпечує можливість глибокого комплексного аналізу стану агроландшафтів. Особливу увагу наукової спільноти та практиків слід звернути на нові, нетипові фактори деградації, такі як масштабне засмічення полів залишками військової

інфраструктури (оптоволоконними кабелями, полімерними матеріалами), які потребують розробки нових інженерних рішень для вилучення. Поєднання супутникового моніторингу високої роздільної здатності, дронів технологій, методів фітореMediaції та глибокого розуміння екосистемних процесів дозволить не лише нівелювати наслідки бойових дій, відновити продуктивність земель, але й сформувати надійний екологічний фундамент для їх сталого використання в майбутньому.

1. Цицюра Я.Г., Шкатула Ю.М., Забарна Т.А., Пелех Л.В. (2022). Інноваційні підходи до фітореMediaції та фіторекультивациї у сучасних системах землеробства. Монографія. Вінниця: ТОВ «Друк». 1200 с.

2. Скляр Ю.Л., Капінос Н.О., Бузіна І.М. (2021). Сучасні методи досліджень для формування сталих агроландшафтів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. 32 (71) № 2., 261-267.

3. Buzina I.M., Khainus D.D., Sopova N.V., Sopov D.S., Cherednychenko I.V., Havriushenko H.V. (2025). Construction of a digital relief model of the dendrology park using GIS technologies. *Екологічні науки: наук.-практ. журнал / Видавничий дім «Гельветика»*. 27-32с.

4. Голубцов О.Г. та ін. (2021). Геоінформаційний аналіз антропогенних змін ландшафтів лісостепової зони України. *Український географічний журнал*. № 3. С. 40–55.

**Даценко Людмила, Тітова Світлана, Дубницька Маргарита**  
**Київський національний університет імені Тараса Шевченка**

## **ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ КОНСОЛІДАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОГО ЗЕЛЕНОГО КУРСУ**

Як головний учасник світової продовольчої системи, Україна повинна долучатися до євроінтеграційних процесів та новітніх тенденцій у сільському господарстві. Тому питання впровадження європейських практик в аграрному землекористуванні є пріоритетними як для аграрних виробників, так і для територіальних громад. Аграрний сектор економіки є найбільш чутливим до проблем, пов'язаних із зміною клімату, продовольчою та водною безпекою, деградацією земель та втратою біорізноманіття, тоді як має формувати продовольчу безпеку, необхідність посилення якої стало особливо відчутною у період збройної агресії рф. Це актуалізує необхідність проведення наукових досліджень, спрямованих на удосконалення ґрунтоводоохоронних моделей систем землеробства з контурно-ландшафтною організацією території землекористувань, з урахуванням інтегрованих систем управління земельними і водними ресурсами, охорони родючості ґрунтів і водних екосистем, формування сталих агроландшафтів в контексті запобігання зміни клімату через скорочення антропогенних викидів і збільшення абсорбції парникових газів та забезпечення поступового переходу до низьковуглецевого розвитку аграрного сектору держави. Сьогодні впровадження сільськогосподарських практик чітко показує, що саме є важливим для відповідності Європейському зеленому курсу та Спільній аграрній політиці ЄС [1]. Євроінтеграційні процеси щодо аграрного землекористування в Україні зосереджуються на трансформації сільського господарства та адаптації національного законодавства до спільної аграрної політики (САП ЄС) та вимог ЄС.

Враховуючи сучасні виклики, зокрема збереження родючості ґрунтів, еколого-орієнтоване аграрне землекористування є вкрай важливою проблемою, оскільки війна триває, і це створює цілу низку додаткових негативних наслідків [2]. Так, під час війни, за період з 24 лютого 2022 року по 23 лютого 2025 року, викиди парникових газів, спричинені російським вторгненням, сягнули 230 мільйонів тон CO<sub>2</sub> еквіваленту. Викиди за три роки повномасштабної війни можна порівняти з загальним обсягом річних викидів одразу чотирьох європейських

країн – Австрії, Угорщини, Чехії та Словаччини разом узятих, або ж викидам від 120 мільйонів автомобілів на викопному паливі. Найбільша кількість викидів пов'язана безпосередньо із бойовими діями – 82,1 млн тон CO<sub>2</sub> екв., що становить 36% від загального обсягу. Оцінка кліматичної шкоди від війни – це доволі новий крок, адже раніше не існувало поширеної практики, тим паче в умовах війни, проведення настільки детальної і комплексної оцінки впливу війни на клімат. Це створює можливість для України не лише оцінити масштаб шкоди, але й адвокатувати на міжнародному рівні питання екологічної та кліматичної відповідальності агресора.

Для кращого розуміння сучасних проблем аграрного землекористування доречно нагадати, що у результаті Земельної реформи 1991 року, 28 млн га сільськогосподарських земель були передані у власність 6,9 млн громадян, на основі безоплатної приватизації. І як результат, колишні сільськогосподарські поля тепер розділені між десятками землевласників, кожен з яких самостійно приймає рішення про використання землі. Через це виникають такі негативні явища, як надмірний випас худоби, віддаленість земельних ділянок та «клиноподібність» землекористування, що перешкоджають оптимізації аграрного землекористування, а також можуть порушувати і не виконувати вимоги до підвищення родючості сільськогосподарських угідь [3]. Слід наголосити на ще одному негативному факторі в результаті земельної реформи: великі сільськогосподарські підприємства, агрохолдинги, отримали преференції, внаслідок чого проявлялись приховані форми лендграббінгу (захоплення земельних ділянок). Таким чином, виходячи з того, що в країні велика частина земельних угідь фрагментована, постає питання необхідності просторового об'єднання сільськогосподарських угідь.

Слід звернути увагу на ще один фактор: на початок бойових дій РФ на території України кількість агрохолдингів складала біля 160, сільськогосподарські землі які обробляли становили до 3,6 млн га., а фермерські підприємства у кількості біля 39 тис. – 15,9 млн га. Про це свідчать результати досліджень EU integration of Ukraine – assessing the challenges for agri-food public authorities середня агропромислова компанія в Україні володіє 514 га, що у 13,8 разів більше, ніж 37 га в ЄС [4].

Таким чином, виходячи з того, що в країні велика частина земельних угідь фрагментована, постає питання необхідності просторового об'єднання сільськогосподарських угідь. На нашу думку консолідація земель, є одним із напрямків адаптації земельного законодавства до вимог Європейського союзу і є відносно новим і практично невідпрацьованим питанням для України [5].

Для забезпечення сталого аграрного землекористування, виникає необхідність зосередити увагу на впровадженні механізмів консолідації земель. Оптимізацію системи землекористування можливо вирішити за допомогою відміни неефективного процесу подрібнення земельних ділянок, затвердження відповідної законодавчої бази та впровадження світових практик щодо консолідації земель. Через масову фрагментацію землекористування, зростаючу вагомість територіальних громад сільських територій, консолідація земель стає головною складовою просторових стратегічних планів розвитку, також має важелі впливу при впровадженні інфраструктурних проєктів, які направлені на підвищення добробуту населення на цих територіях [6].

Крім того, відкриття ринку земель сільськогосподарського призначення вимагає дієвого законодавчого механізму закріплення земельних відносин, які б удосконалювали правове регулювання консолідації земель сільськогосподарського призначення, створювали механізми для вирішення проблем фрагментації земель, та сприяли розвитку аграрного виробництва та одночасно сприяли збереженню біорізноманіття, що визначає стійкість та здатність адаптуватися до змін навколишнього середовища [6, 7, 8].

З акцентуємо увагу на досвіді країн Європейського союзу з питань консолідації земель. На початку, фермери для отримання більших субсидій розорювали навколишні землі шляхом об'єднання сусідніх полів, при цьому руйнувались створенні природою екологічні системи. Такі дії призвели до порушення балансу в екосистемах та зникнення біорізноманіття. Однак,

для нівелювання негативних наслідків цих процесів, у Європейському союзі запроваджено «зелені» дотації, які спрямовуються на поновлення раніше зруйнованих таким підходом сільськогосподарських угідь. Тут доречно зауважити, в усіх стратегічних документах ЄС та США закріплені положення щодо збереження довкілля [9].

Крім цього, у червні 2024 року країни ЄС прийняли План відновлення довкілля до 2050 року. Згідно з документом, до 2030 року держави-члени мають відновити щонайменше 30% територій, до 2040 року – 60%, а до 2050 року – 90%. До 2030 року пріоритетом будуть території мережі Natura 2000 [10]. Що стосується України, то Закон «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України до 2030 року», визначає збереження трав'янистих екосистем, що частково впливає на вирішення проблеми зникнення біорізноманіття у черезсмужжі та прибережних смугах, в ареалі сільськогосподарських угідь. Також, задекларовано збільшення пасовищ та сіножаті, так, в 2015 році пасовища та сіножаті становили 13% площі держави, а у 2030 році цей показник має зрости до 15,8% [11].

Таким чином, для формування сталого аграрного землекористування, консолідація земель сільськогосподарського призначення має забезпечити збалансованість розвитку, з впровадженням наступних напрямків: економічний – ефективне ресурсне використання, максимізація доходів; екологічний – збереження навколишнього середовища (родючості ґрунтів, біорізноманіття тощо); соціальний – забезпечення добробуту та благополуччя населення сільських територій з розвитком інфраструктури.

Слід наголосити на тому, що постійне збільшення виробництва продукції рослинництва без урахування кліматичних реалій раціонального землекористування, призводить до дисбаланса, зменшенню накопичення гумусу в ґрунтах, зміни швидкості мінералізації, що є однією з причин збільшення викидів вуглецю з сільськогосподарських угідь. Водночас, орієнтація на кліматично-орієнтоване сільське господарство може стати вагомим механізмом у процесах адаптації до кліматичних змін. Конкретних рекомендацій для нівелювання зазначених процесів поки що не має і тому для кожного визначеного регіону існують свої особливості та стратегії. Як зазначають науковці С. П. Іванюта, О. О. Коломієць, О. А. Малиновська, для визначення кліматичних особливостей конкретного регіону в рамках обраної стратегії існує низка методів, які можна використовувати щодо адаптації сільського господарства до кліматичних змін [12].

Адаптація Зеленої угоди ЄС та стратегії «Від лану до столу» передбачає постійний моніторинг аграрного виробництва, раціональне використання земельних ресурсів, впровадження інноваційних технологій та методів точного землеробства. Наближення до європейських стандартів вимагає цифровізації сільськогосподарської діяльності, яке передбачає вихід за просторові межі присутності, що дає змогу доступу до даних штучного інтелекту (ШІ) для отримання ширшої змістовнішої інформації щодо землекористування. В рамках Європейського Зеленого курсу та стратегії «Від лану до столу», яка є його складовою частиною, для раціонального використання земельних ресурсів та підвищення продуктивності аграрного виробництва впровадження цифровізації в різних галузях сільського господарства та використання передових технологій і методів точного землеробства є необхідною складовою сталого землекористування.

Отже, забезпечення сталого аграрного землекористування в Україні потребує комплексного підходу, що поєднує консолідацію земель, екологізацію виробництва та адаптацію до кліматичних змін. Впровадження європейських практик і цифрових технологій сприятиме підвищенню ефективності використання земельних ресурсів і збереженню біорізноманіття. Водночас важливим є вдосконалення законодавчого забезпечення та врахування наслідків воєнного впливу на довкілля. Реалізація цих заходів створить передумови для збалансованого економічного, екологічного та соціального розвитку сільських територій України.

1. Varshavska, N. (2018). Спільна аграрна політика ЄС: генезис, основні цільові орієнтири для України. *Економіка і організація управління*, 2(22), 215-222. <https://jeou.donnu.edu.ua/article/view/4813/4844>
2. Kryvenko, Nadiia. "Eu Integration: The Meaning of the Common Agricultural Policy". *Herald of Economics*, no. 4(94), Dec. 2019, pp. 54-69, <https://doi.org/10.35774/visnyk2019.04.054>
3. Шворак, А., & Євсюков, Т. (2014). Способи та методи консолідації земель сільськогосподарського призначення. *Економіст*, 8, 44-48. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/econ\\_2014\\_8\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/econ_2014_8_14)
4. Nivievskiy, Oleg & Neyter, Roman. (2024). An Interim Assessment of the War-Induced Damages and Losses in Ukraine's Agriculture. 5. 2-7. 10.3929/ethz-b-000665476.
5. Datsenko, L., Titova, S., & Dubnytska, M. (2025). Advantages of comprehensive renovation of territorial communities in Ukraine in the context of spatial planning. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 24(1), 15-30. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/200728>
6. Йоакім, Т. (2021). *Землеустрій і консолідація земель на сільських територіях Німеччини*. Видавець Лисенко М. М. [https://www.apd-ukraine.de/fileadmin/user\\_upload/Hanbuecher/Handbuch\\_zur\\_laendl\\_Bodenordnung\\_Thomas\\_UA.pdf](https://www.apd-ukraine.de/fileadmin/user_upload/Hanbuecher/Handbuch_zur_laendl_Bodenordnung_Thomas_UA.pdf)
7. Лісова, Т. В. (2021). Деякі актуальні питання правового забезпечення відновлення земель. *Актуальні проблеми держави і права*, 90, 94-103. <https://dspace.onua.edu.ua/bitstreams/ee66cd77-3710-4ff3-bf72-8e3cea0b7bd6/download>
8. Datsenko, L., Titova, S., Dubnytska, M., Honcharenko, O., & Polyakova, N. (2026). Enhancing sustainable rural development in Ukraine through land consolidation. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 25(1), 71-87. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/217886>
9. European Commission. (2023, January 1). *The EU Nature Restoration Law*. Environment. [https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/nature-restoration-regulation\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/nature-restoration-regulation_en)
10. Mkrtchian, A., & Müller, D. (2024). Assessing the impact of the Russian invasion on crop production in Ukraine with open satellite data. *Ukrainian Analytical Digest*, 5, 8-14. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000665476>
11. Верховна Рада України. (2019). *Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року* (Закон України № 2697-VIII). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
12. Іванюта, С., Коломієць, О. О., Малиновська, О. А., & Якушенко, Л. М. (2020). *Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації*. Національний інститут стратегічних досліджень. [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5\\_sait.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf)

**Жураківський Валентин, Бойчук Василь, Дзендзя Андрій, Різничук Надія**  
**Карпатський національний університет імені Василя Стефаника**

## **БЛАКИТНО-ЗЕЛЕНА ІНФРАСТРУКТУРА ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТРУМЕНТ КЛІМАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ПРОСТОРОВОГО РОЗВИТКУ МІСТА ІВАНО- ФРАНКІВСЬКА**

Інтенсивна урбанізація та глобальні кліматичні зміни формують нові виклики для розвитку міст, зокрема середніх за розміром, до яких належить Івано-Франківськ. Зростання середньорічної температури, збільшення кількості екстремальних опадів, урбаністичне ущільнення та деградація природних екосистем зумовлюють необхідність впровадження інноваційних підходів до управління міським середовищем. У цьому контексті блакитно-зелена інфраструктура (БЗІ) виступає як інтегрована система природоорієнтованих рішень, що поєднує

зелені (рослинні) та блакитні (водні) елементи для забезпечення екологічної рівноваги та підвищення якості життя населення.

За результатами кліматичного аналізу, проведеного на основі даних Гідрометцентру України, у період 1991–2023 рр. середньорічна температура в Івано-Франківську зросла на 1,3 °С, при цьому найбільш суттєве підвищення спостерігається в літній період (+1,6 °С). Кількість днів із температурою понад +30 °С збільшилася більш ніж удвічі – з 8–10 днів на рік у 1990-х роках до 18–22 днів у 2020-х. Це спричиняє формування ефекту «теплого острова», який у центральній частині міста підвищує температуру на 3–6 °С порівняно з приміськими територіями. Водночас інтенсивність короткочасних злив зросла на 15–20 %, що перевантажує систему дощової каналізації та призводить до локальних підтоплень.

Стан зеленої інфраструктури Івано-Франківська характеризується як помірно недостатній. Загальна площа зелених насаджень становить близько 1,9 тис. га, що відповідає приблизно 18–21 м<sup>2</sup> на одного мешканця, тоді як рекомендований показник ВООЗ становить не менше 50 м<sup>2</sup>. При цьому лише близько 35 % зелених зон перебувають у доброму екологічному стані, решта – потребує реконструкції або відновлення. Особливо критичною є ситуація у центральній частині міста, де рівень озеленення не перевищує 10–12 м<sup>2</sup>/особу. Просторова фрагментація зелених насаджень знижує їхню екологічну ефективність, оскільки відсутні безперервні екологічні коридори для міграції видів та циркуляції повітря.

Водні об'єкти відіграють ключову роль у формуванні блакитної складової інфраструктури. Річки Бистриця Надвірнянська та Бистриця Солотвинська, що формують єдину гідрологічну систему, мають значний потенціал для кліматичної регуляції. Однак, за даними екологічного моніторингу, якість води у межах міста відповідає III–IV класу (помірно забруднена – забруднена), що пов'язано з неочищеними стоками та поверхневим зливом з урбанізованих територій. Концентрація завислих речовин перевищує нормативи у 1,5–2 рази, а вміст біогенних елементів (азоту та фосфору) сприяє евтрофікації водних екосистем.

Впровадження елементів блакитно-зеленої інфраструктури демонструє високий рівень ефективності. Зокрема, використання зелених дахів дозволяє зменшити температуру поверхні покрівель на 20–40 °С у літній період та скоротити енергоспоживання будівель на кондиціонування до 25 %. Дощові сади та біоретенційні системи здатні затримувати до 70–90 % дощових вод, що значно знижує навантаження на каналізаційні системи. Пермеабельні покриття (водопроникні) забезпечують інфільтрацію до 50–80 % опадів у ґрунт, що сприяє поповненню підземних вод.

Екосистемні послуги БЗІ мають також значний соціально-економічний ефект. Доведено, що збільшення площі зелених насаджень на 10 % знижує рівень захворюваності на серцево-судинні та респіраторні хвороби на 5–8 %. Озеленені території сприяють зниженню рівня шумового забруднення на 8–12 дБ та підвищують комфорт проживання. Економічні вигоди від впровадження БЗІ оцінюються у співвідношенні 1:3–1:5, тобто кожна інвестована гривня приносить до 5 гривень економічного ефекту у вигляді зменшення витрат на охорону здоров'я, інфраструктуру та енергетику.

Аналіз міжнародного досвіду (Копенгаген, Відень, Берлін) свідчить, що інтеграція БЗІ у міське планування дозволяє зменшити ризики підтоплень до 30–50 % та знизити середньоміську температуру на 1,5–2 °С. Для Івано-Франківська перспективним є створення єдиної екологічної мережі, яка об'єднуватиме парки (парк ім. Т. Шевченка, міське озеро), прибережні зони річок та нові зелені простори у житлових районах.

Серед ключових напрямів розвитку блакитно-зеленої інфраструктури у місті доцільно виділити:

- формування зелених коридорів довжиною понад 15–20 км для з'єднання основних рекреаційних зон;
- реконструкцію прибережних територій із створенням буферних зон шириною 20–50 м;
- впровадження зелених дахів на муніципальних будівлях (потенціал – понад 200 тис. м<sup>2</sup>);
- створення систем локального управління дощовими водами (SUDS);

- збільшення частки водопроникних покриттів до 30 % у новій забудові;
- інтеграцію принципів БЗІ у містобудівну документацію та стратегії розвитку громади.

Особливу роль відіграє участь громади у розвитку БЗІ. Досвід європейських міст показує, що залучення населення до озеленення (урбан-гарденінг, громадські сади) підвищує ефективність використання зелених просторів на 20–30 % та сприяє формуванню екологічної культури.

Таким чином, блакитно-зелена інфраструктура є стратегічним інструментом трансформації Івано-Франківська у кліматично стійке та екологічно збалансоване місто. Її впровадження дозволить не лише мінімізувати негативні наслідки урбанізації, але й створити комфортне середовище для життя, підвищити інвестиційну привабливість міста та забезпечити довгостроковий сталий розвиток.

У межах даного дослідження було проведено оцінку ефективності існуючих та потенційних елементів блакитно-зеленої інфраструктури в місті Івано-Франківську з використанням польових спостережень, аналізу супутникових знімків (Landsat 8, Sentinel-2) та геоінформаційного моделювання. Основна увага була зосереджена на територіях із різним рівнем урбанізації: центральна частина міста, житлові масиви та рекреаційні зони.

За результатами дистанційного зондування встановлено, що середній показник NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) у центральній частині Івано-Франківська становить 0,18–0,25, що відповідає низькому рівню озеленення. Для порівняння, у зоні міського парку ім. Т. Шевченка цей показник досягає 0,55–0,68, що свідчить про високу щільність рослинного покриву. Аналіз показав, що території з NDVI вище 0,5 демонструють зниження температури поверхні на 2,5–4,2 °C у літній період порівняно з урбанізованими ділянками.

Додатково було проведено вимірювання температури повітря у липні 2023 року в різних функціональних зонах міста. У центральній частині (вул. Незалежності, площа Ринок) середня денна температура становила +31,5 °C, тоді як у зоні міського озера та парку – +27,8 °C. Таким чином, різниця температур досягала 3,7 °C, що підтверджує значний охолоджувальний ефект зелених та водних об'єктів.

Оцінка водопроникності поверхонь показала, що в центральній частині міста частка impregmeable-покриттів (асфальт, бетон) перевищує 75 %, тоді як у периферійних районах цей показник становить 40–55 %. Моделювання сценаріїв впровадження permeable-покриттів продемонструвало можливість зменшення поверхневого стоку дощових вод на 35–45 %, що є критично важливим для зниження ризику підтоплень під час інтенсивних опадів.

Також було здійснено оцінку потенціалу впровадження зелених дахів у межах міста. Встановлено, що близько 18–22 % дахів будівель (переважно плоских) є технічно придатними для озеленення. За умови реалізації цього потенціалу можливо створити додатково до 180–220 тис. м<sup>2</sup> зелених площ, що дозволить збільшити загальний показник озеленення міста на 8–10 %.

Поглиблений аналіз просторової організації міського середовища Івано-Франківська дозволив виявити ключові екологічні диспропорції, які можуть бути усунені шляхом впровадження блакитно-зеленої інфраструктури. Використання геоінформаційних методів (QGIS, ArcGIS) дало змогу сформувати карту екологічної фрагментації території, відповідно до якої понад 62 % урбанізованого простору міста характеризується низьким рівнем екологічної зв'язності (індекс connectivity < 0,3).

Особливо гостро проблема проявляється у центральному планувальному ядрі міста, де щільність забудови перевищує 70 %, а коефіцієнт озеленення не перевищує 0,15. За таких умов значно знижується здатність міського середовища до саморегуляції, що підтверджується зростанням концентрації забруднюючих речовин у повітрі. Зокрема, середньорічні концентрації дрібнодисперсного пилу PM<sub>2.5</sub> у центральній частині міста коливаються в межах 18–24 мкг/м<sup>3</sup>, що перевищує рекомендації ВООЗ (5–10 мкг/м<sup>3</sup>) у 2–3 рази.

Важливим аспектом дослідження стало вивчення ролі зелених насаджень у зменшенні рівня атмосферного забруднення. Встановлено, що 1 га міських зелених насаджень здатен поглинати до 70–100 кг пилу на рік та акумулювати до 150 кг CO<sub>2</sub>. За оцінками, збільшення площі зелених зон у центральній частині Івано-Франківська на 25 % може знизити

концентрацію PM2.5 на 10–15 %, що матиме безпосередній позитивний вплив на здоров'я населення.

Отримані результати узгоджуються з науковими дослідженнями регіональних вчених. Зокрема, у працях Бойчука та Різничук (2024, 2025) підкреслюється, що урбанізовані екосистеми Прикарпаття характеризуються високим рівнем трансформації природних ландшафтів, що потребує впровадження інтегрованих екологічних рішень. Дослідження Різничук (2025) також підтверджують, що оптимізація структури зелених насаджень у містах Західної України дозволяє підвищити їхню екологічну стійкість на 20–35 %.

Додатково було проведено аналіз шумового забруднення в різних функціональних зонах міста. Встановлено, що у транспортно-навантажених районах (вул. Галицька, вул. Коновальця) рівень шуму сягає 70–75 дБ, що перевищує допустимі норми на 10–15 дБ. Водночас наявність зелених насаджень (шириною 15–20 м) дозволяє знижувати рівень шуму на 6–10 дБ, виконуючи функцію природного бар'єра.

Оцінка гідрологічного потенціалу території показала, що впровадження систем локального управління дощовими водами (SUDS), зокрема біоретенційних зон та інфільтраційних басейнів, дозволить зменшити пікове навантаження на зливову каналізацію на 25–35 %. При цьому, за розрахунками, навіть часткове впровадження таких систем на площі 10 % урбанізованої території забезпечить затримання до 15–20 тис. м<sup>3</sup> дощових вод під час інтенсивних опадів.

Суттєвим є також вплив БЗІ на соціальні аспекти міського розвитку. За результатами кореляційного аналізу встановлено, що доступність зелених зон (у радіусі 300 м) підвищує рівень задоволеності якістю життя населення на 18–22 %. Це узгоджується з європейськими дослідженнями, які визначають зелену інфраструктуру як один із ключових факторів комфортності міського середовища.

Таким чином, результати просторово-екологічного аналізу підтверджують, що Івано-Франківськ має значний потенціал для розвитку блакитно-зеленої інфраструктури. Використання науково обґрунтованих підходів, з урахуванням регіональних досліджень (Бойчук, Різничук), дозволить підвищити ефективність управління міським середовищем, знизити екологічні ризики та забезпечити довгострокову стійкість урбанізованих територій.

1. World Health Organization. (2016). Urban green spaces and health: A review of evidence. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

2. European Commission. (2021). Evaluating the impact of nature-based solutions. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

3. Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2017). Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas. Cham: Springer.

4. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2022). Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні. Київ.

5. Гідрометцентр України. (2023). Кліматичні зміни в регіонах України. Київ.

6. Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2012). Green infrastructure: Linking landscapes and communities. Washington: Island Press.

7. Fletcher, T. D., et al. (2015). SUDS, LID, BMPs: Urban drainage systems evolution. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542.

8. UN-Habitat. (2020). Nature-based solutions for urban resilience. Nairobi.

9. Boichuk Vasyl, Riznychuk Nadiia. Urban greening in Ivano-Frankivsk: ecological status and prospects for sustainable development. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Biology*[https://journals.pnu.edu.ua/index.php/jpnumbio/Vol.11\(2024\),P189-P194](https://journals.pnu.edu.ua/index.php/jpnumbio/Vol.11(2024),P189-P194) DOI: <https://doi.org/10.15330/jpnumbio.11.189-194> URL: <https://journals.pnu.edu.ua/index.php/jpnumbio/article/view/9886/9585>

10. Бойчук В.Б., Різничук Н.І. Сучасний стан озеленення міста Івано-Франківськ у контексті екологічної сталості: проблеми, виклики та стратегічні напрями розвитку. *Екологічні науки : науково-практичний журнал* / Головний редактор Бондар О.І. – К. : Видавничий дім «Гельветика», 2025. – №

4(61). С. 233-236. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.4-61.36>  
<http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2025/61/38.pdf>

11.Boichuk VasyI, Riznychuk Nadiia. Ecological inventory and condition of green plantings in the historical center of Ivano-Frankivsk: a case study of Mickiewicz square and the Ruska Triytsia square. Journal of VasyI Stefanyk Precarpathian National University. Biology <https://journals.pnu.edu.ua/index.php/jpnbio/Vol.12> (2025), P101-P105. DOI: <https://doi.org/10.15330/jpnbio.12.101-105> URL: <https://journals.pnu.edu.ua/index.php/jpnbio/article/view/10004>

12.Бойчук В.Б., Різничук Н.І. Біоекологічна оцінка деревно-чагарникових насаджень скверу Валуний в Івано-Франківську: структура, життєвий стан та перспективи реконструкції. Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О.І. – К. : Видавничий дім «Гельветика», 2025. – № 5(62), ч.2. С. 213-218. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.35> URL: [https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2025/62/part\\_2/37.pdf](https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2025/62/part_2/37.pdf)

**Іваха Олег, Руда Марія**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**

## **СПОСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ПИЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ В ЖИТЛОВІЙ ЗАБУДОВІ**

У роботі розглянуто сучасні підходи до моделювання екологічних ризиків пилового забруднення атмосферного повітря в умовах житлової забудови. Особливу увагу приділено нелінійним моделям адсорбції та акумуляції забруднювачів, зокрема моделі Фрейндліха. Обґрунтовано доцільність її використання для опису процесів взаємодії пилових частинок із поверхнями ґрунту та урбанізованого середовища. Наведено основні методи оцінювання ризику, включаючи індексні, статистичні та математичні підходи.

Пилове забруднення атмосферного повітря є одним із ключових факторів негативного впливу на довкілля та здоров'я населення в умовах житлової забудови. Особливо актуальною є проблема накопичення дрібнодисперсних частинок (PM<sub>2.5</sub> та PM<sub>10</sub>), які здатні проникати в організм людини та викликати хронічні захворювання [1].

За даними українських дослідників, рівень пилового навантаження у містах значно залежить від щільності забудови, інтенсивності транспорту та наявності зелених насаджень [2]. В умовах урбанізації відбувається не лише перенесення пилу, але й його акумуляція у ґрунтах та на поверхнях будівель, що потребує застосування адекватних математичних моделей.

До основних методів моделювання екологічних ризиків відносяться наступні: 1. Індексні методи, які базуються на використанні інтегральних показників, таких як індекс забруднення атмосфери (ІЗА). Вони дозволяють оцінити сумарний вплив кількох забруднювачів, але не враховують складні нелінійні процеси взаємодії [3]; 2. Статистичні методи (регресійний аналіз, кореляція) використовуються для встановлення залежностей між концентраціями пилу та факторами впливу. Проте вони мають обмеження при описі процесів накопичення та адсорбції [4]; 3. Дисперсійні моделі - Гаусівські моделі розсіювання широко застосовуються для прогнозування поширення пилу в атмосфері. Вони ефективні для оцінки концентрацій, але не враховують процеси осадження та взаємодії з поверхнями [4].

За даними досліджень українських учених, процеси накопичення важких металів і пилових частинок у ґрунтах мають саме нелінійний характер [3,4,5]. За даними більшості науковців оптимальною моделлю є модель Фрейндліха яка враховує гетерогенність середовища. дана модель описує насичення на поверхні. Вона також використовується для

прогнозування накопичення пилу у ґрунтах; оцінки вторинного забруднення повітря; аналізу впливу на рослинність; визначення зон підвищеного ризику.

У житловій забудові це дозволяє оцінити довготривалий вплив пилу, який осідає та повторно піднімається в атмосферу.

Найбільш ефективним є поєднання гаусівських моделей (розсіювання) та моделей адсорбції (Фрейндліха).

Необхідно зазначити, що Гаусівська модель розсіювання пилу є одним із базових і найбільш застосовуваних інструментів для оцінки якості атмосферного повітря в умовах техногенного навантаження. Її ключова перевага полягає у відносній простоті математичного апарату та можливості отримання оперативних прогнозів концентрацій забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери. Це особливо важливо для промислових підприємств (цементних заводів, кар'єрів, металургійних об'єктів), де необхідно швидко оцінювати вплив викидів пилу на навколишнє середовище та населення. Використання моделі дозволяє встановити просторовий розподіл концентрацій пилу залежно від метеорологічних умов (швидкість і напрям вітру, стабільність атмосфери), характеристик джерела викиду (висота труби, температура, швидкість виходу газопилової суміші) та рельєфу місцевості. Це дає змогу визначати зони максимального забруднення, будувати карти ізоліній концентрацій і прогнозувати перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК), що є критично важливим для екологічного моніторингу та управління ризиками. У наукових дослідженнях модель широко використовується як інструмент первинної оцінки перед застосуванням більш складних чисельних моделей, таких як CFD або моделі на основі рівнянь турбулентної дифузії.

Разом з тим, Гаусівська модель має низку обмежень. Вона базується на припущеннях про стаціонарність процесу, однорідність атмосферних умов та рівнинний рельєф, що не завжди відповідає реальним умовам, особливо в міських агломераціях або складному рельєфі. Модель також обмежено враховує вторинні процеси, такі як агломерація частинок, осадження або хімічні перетворення. У випадках змінних метеоумов або наявності складних джерел викидів її точність може знижуватися.

Незважаючи на це, Гаусівська модель залишається ефективним і доцільним інструментом для інженерних розрахунків і екологічної оцінки. Вона добре підходить для попереднього аналізу, навчальних цілей та практичних завдань моніторингу. У сучасних умовах її використання є найбільш ефективним у поєднанні з геоінформаційними системами (GIS), статистичними методами (наприклад, у IBM SPSS Statistics) та більш складними моделями, що дозволяє підвищити достовірність прогнозів і забезпечити комплексний підхід до оцінки пилового забруднення.

Отже, застосування Гаусівської моделі розсіювання пилу є науково обґрунтованим, практично доцільним і важливим елементом системи екологічного моніторингу. Вона забезпечує баланс між точністю та простотою, що робить її незамінною на етапах попереднього аналізу та прийняття управлінських рішень у сфері охорони атмосферного повітря.

Такий підхід дозволяє врахувати як просторовий, так і часовий аспект забруднення.

Таким чином пилове забруднення в умовах житлової забудови має складний багатофакторний характер. Для його адекватного опису необхідно використовувати нелінійні моделі, зокрема модель Фрейндліха та Гаусівську модель розсіювання пилу. Комплексне застосування математичних моделей забезпечує більш точне прогнозування та ефективне управління якістю атмосферного повітря.

1. Бойченко, С., Козак, О., Андрішко, Ю., & Яринка, В. (2024). Aerosol pollution of atmospheric air by PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particles and the state of green spaces in Kyiv. *Biota. Human. Technology*.

2. Турос, О. І., Петросян, А. А., Маремуха, Т. П., Моргульова, В. В., Брезіцька, Н. В., Кобзаренко, І. В., & Царенок, Т. В. (2023). Assessment of ambient air pollution by particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) and risk for human health caused by war actions. *Wiadomości Lekarskie*, 76(4), 738–744.

3. Кагукіна, А. М., & Пацева, І. Г. (2025). Оцінка та прогноз динаміки атмосферних поллютантів урбоєкосистеми Житомира. *Technology Audit and Production Reserves*.

4. Адаменко, С. Ю., & Архипова, Л. М. (2024). Study of patterns of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> changes in atmospheric air of Ivano-Frankivsk region. *Environmental Safety and Natural Resources*, 51(3), 47–58.

5. Андрішко, Ю., Клименко, К., & Майданович, Н. (2025). Monitoring atmospheric aerosol pollution in Kyiv under natural and war-related impacts using Sentinel-5P and public sensor networks. *GeoTerrace Conference Proceedings*.

**Качан Сергій**

*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМІ ФІНАНСОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ІНТЕГРОВАНИХ СТРУКТУР БІЗНЕСУ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД**

У сучасних умовах повоєнної трансформації економіки України особливого значення набуває проблема фінансового забезпечення сталого розвитку інтегрованих структур бізнесу, які виступають важливими суб'єктами економічного відновлення держави. Руйнування виробничої інфраструктури, зміна логістичних маршрутів, нестабільність фінансового середовища, високий рівень ризиків та посилення глобальної конкуренції формують необхідність переходу до нової моделі управління інтегрованими структурами бізнесу, заснованої на принципах цифровізації, інноваційності, екологічної безпеки та ресурсної ефективності. У цьому контексті інформаційні технології стають ключовим інструментом забезпечення фінансової стійкості інтегрованих бізнес-структур, оптимізації управління фінансовими потоками та формування адаптивної системи стратегічного розвитку в умовах повоєнного періоду.

Фінансове забезпечення сталого розвитку інтегрованих структур бізнесу тісно пов'язане із впровадженням екологічно орієнтованих цифрових технологій. У сучасних умовах сталий розвиток передбачає поєднання економічної ефективності, екологічної безпеки та соціальної відповідальності бізнесу [1]. Використання цифрових платформ екологічного моніторингу, систем контролю використання ресурсів, технологій енергетичного менеджменту та автоматизованого управління виробничими процесами дозволяє інтегрованим структурам бізнесу мінімізувати негативний вплив на довкілля, підвищувати енергоефективність та забезпечувати відповідність міжнародним стандартам ESG-управління. У сучасних умовах інформаційні технології стають важливим елементом формування «зеленої» моделі розвитку бізнесу та забезпечення екологічної стійкості виробничих систем.

Особливого значення набуває цифровізація процесів залучення фінансових ресурсів для розвитку інтегрованих структур бізнесу. Використання FinTech-технологій, цифрових платформ інвестування, електронних систем кредитування та блокчейн-технологій дозволяє забезпечити підвищення прозорості фінансових операцій та розширення доступу до інвестиційних ресурсів [2]. У повоєнний період важливу роль відіграють механізми міжнародного фінансування, грантової підтримки та залучення інвестицій у відновлення виробничої інфраструктури й реалізацію екологічних проєктів. Інформаційні технології забезпечують ефективну взаємодію інтегрованих структур бізнесу з банківськими установами, інвестиційними фондами, міжнародними фінансовими організаціями та державними інституціями, що сприяє формуванню стійкої системи фінансового забезпечення розвитку бізнесу.

У системі управління інтегрованими структурами бізнесу важливу роль відіграють цифрові технології у сфері ризик-менеджменту. Повоєнний період характеризується високим

рівнем фінансових, інвестиційних, екологічних та кібернетичних ризиків, що потребує впровадження сучасних інструментів прогнозування та моделювання ризикових ситуацій. Використання аналітичних платформ, систем автоматизованого аналізу даних та технологій штучного інтелекту дозволяє інтегрованим структурам бізнесу оцінювати рівень впливу зовнішніх і внутрішніх загроз на результати діяльності, формувати адаптивні стратегії розвитку та забезпечувати стабільність функціонування корпоративних систем. Особливого значення набуває цифровий моніторинг логістичних процесів, енергетичних витрат та екологічних показників діяльності підприємств, що входять до інтегрованих структур бізнесу.

На рівні державної політики важливим завданням є формування інституційного середовища, яке стимулюватиме цифрову трансформацію інтегрованих структур бізнесу та підтримуватиме реалізацію принципів сталого розвитку. Це передбачає розвиток цифрової інфраструктури, удосконалення механізмів державного фінансування інноваційних та екологічних проєктів, підтримку цифровізації бізнес-процесів та створення сприятливих умов для залучення інвестицій у модернізацію виробничої інфраструктури. Важливого значення набуває розвиток механізмів державно-приватного партнерства у сфері цифрової трансформації економіки та підтримки екологічно орієнтованих бізнес-ініціатив.

У сучасних умовах одним із ключових елементів фінансового забезпечення сталого розвитку інтегрованих структур бізнесу є забезпечення інформаційної безпеки та стійкості цифрової інфраструктури. Зростання рівня кіберзагроз, ризиків втрати даних та порушення функціонування інформаційних систем потребує впровадження сучасних механізмів кіберзахисту, цифрової автентифікації та систем резервного збереження інформації. Надійність цифрової інфраструктури є важливою передумовою безперервності фінансових процесів та ефективного функціонування інтегрованих структур бізнесу в умовах високого рівня невизначеності.

Отже, інформаційні технології виступають важливим інструментом фінансового забезпечення сталого розвитку інтегрованих структур бізнесу у повоєнний період. Їх використання сприяє підвищенню ефективності фінансового менеджменту, оптимізації використання ресурсів, забезпеченню екологічної безпеки та формуванню адаптивної системи управління бізнесом. Інтеграція цифрових технологій у систему фінансового забезпечення створює передумови для підвищення конкурентоспроможності інтегрованих структур бізнесу, забезпечення їх довгострокової стійкості та реалізації принципів сталого розвитку в умовах повоєнного відновлення економіки України..

1. Бондарчук, М. К. (2023). Механізм моніторингу функціонування бізнес-структури. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". Серія: "Економічні науки"*, 11. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-11-9385>

2. Бондарчук, М. К. (2023). Інформаційне забезпечення моніторингу бізнес-структур. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". Серія: "Економічні науки"*, 10. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-10-9384>

**Кирлик Наталія**  
*Ужгородський національний університет*

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У РОЗВИТКУ НАЦІОНАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ ПОВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ**

У сучасних умовах воєнних та післявоєнних трансформацій розвиток національної транспортно-логістичної системи набуває стратегічного значення для забезпечення економічної стійкості держави, відновлення виробничого потенціалу, інтеграції України у європейський

транспортний простір та реалізації цілей сталого розвитку. Руйнування транспортної інфраструктури, зміна логістичних маршрутів, зростання витрат на перевезення та посилення ризиків функціонування ланцюгів постачання актуалізують необхідність формування нової моделі транспортно-логістичної системи, заснованої на принципах цифровізації, екологічної безпеки, адаптивності та інноваційного управління. У цьому контексті інформаційні технології стають одним із ключових інструментів модернізації транспортно-логістичних процесів і забезпечення ефективного функціонування логістичної інфраструктури в умовах повоєнної відбудови.

Особливого значення набуває впровадження цифрових технологій у систему управління транспортними потоками, логістичними операціями та інфраструктурними об'єктами. Використання Big Data, штучного інтелекту, Інтернету речей (IoT), геоінформаційних систем та хмарних платформ дозволяє здійснювати моніторинг транспортної інфраструктури в режимі реального часу, оптимізувати маршрути перевезень, прогнозувати навантаження на транспортні вузли та забезпечувати оперативне реагування на кризові ситуації. У сучасних умовах цифрові платформи виступають основою інтеграції різних видів транспорту, забезпечуючи формування єдиного логістичного простору та підвищення ефективності мультимодальних перевезень [1].

Водночас цифровізація транспортно-логістичної системи є важливим чинником забезпечення екологічної безпеки та зниження негативного впливу транспортної діяльності на довкілля. Використання інформаційних технологій у сфері транспортного менеджменту дозволяє оптимізувати витрати пального, скоротити рівень викидів парникових газів, зменшити обсяги неефективних перевезень та підвищити рівень енергоефективності логістичних процесів. Особливу роль у цьому процесі відіграють цифрові системи екологічного моніторингу, які забезпечують контроль за рівнем забруднення атмосферного повітря, станом транспортної інфраструктури та екологічними ризиками функціонування логістичних об'єктів [2]. Таким чином, цифровізація транспортної системи сприяє реалізації концепції «зеленої логістики» та інтеграції екологічних стандартів у систему управління транспортними процесами.

У процесі повоєнної відбудови важливого значення набуває розвиток цифрової транспортної інфраструктури та інтеграція України до європейських транспортно-логістичних мереж. Впровадження електронного документообігу, автоматизованих систем митного контролю, цифрових платформ управління вантажопотоками та систем електронної взаємодії між учасниками логістичного ринку створює передумови для скорочення часових витрат на перевезення, підвищення прозорості логістичних операцій та посилення конкурентоспроможності національної транспортної системи. Важливу роль у цьому процесі відіграє адаптація української транспортної інфраструктури до стандартів Європейського Союзу, зокрема у сфері цифрової взаємодії, екологічного регулювання та безпеки транспортних перевезень.

На рівні державної політики ключовим завданням є формування комплексного механізму цифрової модернізації транспортно-логістичної системи, який поєднуватиме інституційні, технологічні, екологічні та інвестиційні інструменти розвитку. Це передбачає реалізацію державних програм цифровізації транспортної інфраструктури, підтримку інноваційних логістичних рішень, розвиток інтелектуальних транспортних систем та залучення міжнародних інвестицій у відновлення транспортних коридорів і логістичних хабів. Особливого значення набуває розвиток механізмів державно-приватного партнерства у сфері цифрової трансформації транспортної інфраструктури та впровадження екологічно орієнтованих логістичних технологій.

Отже, інформаційні технології виступають одним із ключових факторів розвитку національної транспортно-логістичної системи в умовах повоєнної відбудови України. Їх використання сприяє підвищенню ефективності транспортних процесів, забезпеченню екологічної безпеки, оптимізації використання ресурсів та формуванню сучасної моделі логістичного управління, орієнтованої на принципи сталого розвитку. У сучасних умовах цифровізація транспортно-логістичної системи є необхідною передумовою забезпечення

економічної стійкості держави, інтеграції у міжнародний транспортний простір та формування конкурентоспроможної економіки післявоєнного періоду.

1. Бойченко, М. В. (2023). Відновлення та розвиток транспортної інфраструктури України в умовах війни та повоєнної відбудови. *Економічний вісник Донбасу*, 3 (73), 118–124.

2. Гурч, Л. М., & Коцюба, О. С. (2024). Сьогодення та перспективи розвитку транспортно-логістичної системи України в умовах військового стану та повоєнної відбудови. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35 (74), 4, 315–321.

**Королько Сергій**

*Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного*

## **СУЧАСНІ ПРИРОДНІ ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ УТЕПЛЮВАЧІ НА ОСНОВІ КОСТРИЦІ**

В умовах сучасної війни питання безпеки довкілля набуває особливої актуальності та потребує комплексного підходу до його забезпечення. Воєнні дії супроводжуються значним забрудненням повітря, ґрунтів і водних ресурсів унаслідок руйнування інфраструктури та застосування озброєння. Накопичення токсичних речовин і продуктів горіння створює довготривалі ризики для здоров'я населення та функціонування різних екосистем. Особливої уваги потребує використання безпечних будівельних матеріалів, які не погіршують екологічний стан у складних умовах в процесі відновлення територій. Саме тому екологічна складова при виборі матеріалів і технологій будівництва стає важливим чинником забезпечення сталого розвитку навіть у період воєнних викликів.

Що означає на сьогодні поняття «екологічно чисті», «природні», «натуральні»... Так, ми, звичайно, розуміємо, коли нас про це питають. Проте, досить рідко замислюємось над тим, де ми використовуємо ці матеріали, в яких умовах ми проживаємо, де проводимо частину свого життя, чи комфортні ці умови, тощо...

Мова сьогодні буде йти про екологічно чисті утеплюючі матеріали. Останнім часом, в тому числі в будівельній галузі, актуальним є використання утеплювачів на основі природної сировини [1]. Забезпечення енергозбереження в житлово-комунальному секторі України досягається за рахунок застосування матеріалів з покращеними теплоізоляційними властивостями. Проте, поряд із своїми теплоізоляційними характеристиками вони завдають значної шкоди екології, в тому числі можуть виділяти канцерогенні речовини, які є шкідливими для здоров'я людей. Окрім цього, більшість штучних матеріалів піддаються горінню, що створює ще більшу небезпеку їх застосування. Сюди відносять штучні матеріали, пінополістирол, частково скловата, пінопласт, тощо... [2, 3]. Поряд з високими теплоізоляційними властивостями штучні матеріали утеплення характеризуються:

- часто неякісним їх виготовленням;
- небезпекою загоряння та тління штучних утеплювачів;
- нерівномірним перерозподілом тепла внаслідок нагріву бетонних стін, наприклад, в міській забудові;
- небезпекою життя та здоров'я (токсичністю);
- величезною кількістю викидів CO<sub>2</sub> (понад 30% викидів CO<sub>2</sub> припадає на виготовлення утеплювачів), що дає високий вуглецевий слід і впливає на глобальне потепління через викиди парникових газів.

Серед природних теплоізоляційних матеріалів всім відома деревина. З дерева виготовляли безліч різних будинків, захисних споруд тощо. В дерев'яних будинках

найкомфортніше перебувати. Разом з тим, деревина горить, що є вкрай небезпечним. Поряд з такими деревними матеріалами є ряд природних утеплюючих матеріалів таких як солома, деревна стружка, відходи деревообробки волокнистих матеріалів, очерет, костриця льону, які практично є відходами виробництв та мало використовуються. Такі природні компоненти, знаходячись в матриці на основі негорючого матеріалу стають безпечними і не піддаються горінню [3, 4].

Давайте звернемось до історії, які матеріали використовували до нас наші діди та прадіди, який надійний і довговічний матеріал-утеплювач застосовували в минулому. Цементні будівлі не дихають і завдають чимало клопоту своїм господарям. А ось глина – зовсім інша справа: з неї будували житло в Україні протягом багатьох століть.

Закордонний досвід показує, що за багатьма показниками в плані утеплення будинків і споруд ми суттєво відстаємо від розвинутих країн. У зв'язку з цим, на даний час, висувається вже вимога не лише максимально утеплити будинок, а також забезпечити ефект дихання стін. Так званий будинок «нуль-енергії» є ефективним лише при достатньому теплообміні із зовнішнім середовищем. Переважна більшість розповсюджених матеріалів для теплової ізоляції є синтетичними продуктами та не володіють ефектом «дихання».

Давно відпрацьовані технології для потреб теплового захисту будівель на перший погляд видаються успішними, однак, такі питання, як горючість, канцерогенність та токсичність окремих виробів та їх компонентів, слабка стійкість до тривалого впливу природних та експлуатаційних чинників, часто не актуалізуються.

Перспективним на сьогоднішній час є використання традиційних модифікованих будівельних матеріалів на мінеральній основі [4]. В цьому питанні на перший план виходять теплоізоляційні матеріали на основі природної сировини. Вони можуть виготовлятися з використанням льону, очерету, соняшника та інших природних компонентів.

Костриця льону – що це за матеріал? Це здерев'янілі частини стебел прядильних рослин (льону), одержувані під час її первинної обробки. У загальній масі костриці міститься до 64 % целюлози. У непряди́мій групі волокон, які знаходяться в костриці, місткість чистої целюлози сягає 80 %. Це відкриває унікальні можливості застосування костриці в будівельній галузі. До теплоізоляційних матеріалів, які виготовляються на основі костриці, належать костроплити та костроблоки для будівництва. За новими технологіями із волокна костриці виготовляють оздоблювальні матеріали для офісів під дерево та мармур. При цьому, цікавими представляють дослідження використання натуральних лусочок костриці при облаштуванні цементних стяжок та гіпсових штукатурок. По друге – це використання костриці в теплоізоляційних матеріалах.

Попередніми дослідженнями встановлено, що при збільшенні вмісту в'язучого в костробетоні зростає його густина та теплопровідність. Разом з тим, використання часткової заміни костриці льону призводить до зменшення середньої густини до одиниці води замішування та зниження загальної міцності. Науковцями запропоновано виготовлення теплоізоляційних матеріалів з використанням натуральних відходів промисловості – костриці льону та досліджено їхні властивості. При цьому розроблено спеціальне в'язуче високотемпературного обігріву суміші вапняку та мергелю з попередньо підібраним сировинним складом та одержання на його основі спеціального в'язучого. Таке в'язуче частково володіє гідралічними властивостями та має контрольовані термінами схоплення, карбонізації та висихання. В лабораторних умовах отримано зразки теплоізоляційних матеріалів, які ефективно себе зарекомендували. Коефіцієнт теплоізоляції таких матеріалів при 25 °C становив 0,070-0,09 Вт/м °C. Представлені дослідження визначають можливість використання відходів промисловості, зокрема костриці льону та очерету для виробництва легких та екологічно чистих теплоізоляційних матеріалів.

1. Баженов, Ю. М., & Комар, А. Г. (2017). *Будівельні матеріали: підручник*. Вища школа.
2. Кривенко, П. В., & Пушкарьова, К. К. (2016). *Екологічне будівництво та матеріали: монографія*. Ліра-К.

3. Пушкарьова, К. К., & Бондаренко, О. П. (2020). *Сучасні теплоізоляційні матеріали на основі природної сировини: монографія*. КНУБА.
4. Саницький, М. А., & Марущак, У. Д. (2019). *Легкі бетони на основі рослинних заповнювачів: монографія*. Вид-во Львівської політехніки.

Левко Анна

*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ПОВОЄННОМУ ВІДНОВЛЕННІ**

Повномасштабна війна в Україні суттєво змінила підходи до відновлення економіки, інфраструктури, житлового фонду, енергетики та систем життєзабезпечення територіальних громад. Повоєнне відновлення не може розглядатися лише як механічне відтворення зруйнованих об'єктів у довоєнному вигляді. Його зміст має полягати у переході до якісно нової моделі розвитку, що поєднує безпекову стійкість, енергоефективність, раціональне використання ресурсів, екологічну збалансованість, цифровий моніторинг і технологічну модернізацію. У цьому контексті особливого значення набувають альтернативні ресурсозберігаючі технології, здатні зменшити залежність громад і підприємств від дефіцитних ресурсів, підвищити автономність локальних систем та забезпечити довгострокову економічну ефективність відновлення.

Актуальність теми посилюється масштабами руйнувань і потреб України у реконструкції. За оновленою оцінкою RDNA5, підготовленою Урядом України, Світовим банком, Європейською комісією та ООН, станом на 31 грудня 2025 року загальна вартість відновлення і реконструкції України на наступне десятиліття оцінюється майже у 588 млрд дол. США, а найбільш постраждалими залишаються житловий, транспортний та енергетичний сектори. Це означає, що технологічні рішення у сфері відновлення мають оцінюватися не тільки за критерієм швидкості будівництва чи ремонту, а й за критеріями енергоефективності, ресурсної ощадності, життєвого циклу об'єктів та здатності зменшувати майбутні експлуатаційні витрати.

Метою дослідження є обґрунтування особливостей використання альтернативних ресурсозберігаючих технологій при повоєнному відновленні України з урахуванням потреб енергетичної безпеки, сталого розвитку, модернізації інфраструктури та підвищення стійкості територіальних громад.

Під альтернативними ресурсозберігаючими технологіями у контексті повоєнного відновлення доцільно розуміти сукупність інженерних, енергетичних, будівельних, виробничих, цифрових та організаційних рішень, спрямованих на зменшення споживання енергії, води, матеріалів, землі, палива та фінансових ресурсів за одночасного підвищення функціональності, безпечності й довговічності відновлюваних об'єктів. Їхня відмінність від традиційних технологій полягає у тому, що вони орієнтуються не лише на поточне виконання робіт, а й на мінімізацію сукупних витрат протягом усього життєвого циклу об'єкта.

До основних груп альтернативних ресурсозберігаючих технологій, які мають стратегічне значення для післявоєнного відновлення, належать: технології енергоефективного будівництва; відновлювані джерела енергії; локальні енергетичні системи та мікромережі; технології термомодернізації будівель; водозберігаючі й водоочисні системи; повторне використання будівельних матеріалів; циркулярні виробничі рішення; цифрові системи моніторингу споживання ресурсів; індустриальні технології декарбонізації; модульні й швидкомонтовані конструкції з підвищеними показниками енергоефективності [1].

Першою особливістю використання таких технологій є їхній зв'язок із безпековою стійкістю. В умовах руйнування централізованої енергетичної інфраструктури особливої ваги

набувають децентралізовані рішення: сонячні електростанції, теплові насоси, біоенергетика, акумуляторні системи, малі когенераційні установки, енергетичні кооперативи та локальні мікромережі. Їхнє значення полягає не лише у зменшенні витрат на енергоресурси, а й у забезпеченні безперервності роботи критичної інфраструктури - лікарень, шкіл, центрів надання адміністративних послуг, систем водопостачання, пунктів незламності, соціальних установ і комунальних підприємств.

Другою особливістю є перехід від логіки «відбудувати швидко» до логіки «відбудувати краще». Це означає, що післявоєнна реконструкція повинна враховувати принципи енергоефективності, кліматичної нейтральності, інклюзивності, доступності та довговічності. Ukraine Facility Plan на 2024–2027 роки безпосередньо пов'язує відновлення України із зеленим переходом, розвитком відновлюваної енергетики, водню, електрифікації, енергозберігаючих технологій, промислової декарбонізації та інтеграції українських виробників у глобальні ланцюги створення вартості. Отже, ресурсозбереження має бути не допоміжним, а наскрізним принципом проєктування, фінансування та реалізації відновлювальних проєктів.

Третьою особливістю є необхідність урахування життєвого циклу об'єктів. Традиційний підхід часто зосереджується на мінімізації первинної вартості будівництва. Натомість ресурсозберігаючий підхід передбачає оцінювання не тільки початкових капітальних витрат, а й майбутніх витрат на енергоспоживання, ремонт, обслуговування, модернізацію та утилізацію. Наприклад, енергоефективна школа або лікарня може потребувати більших інвестицій на етапі будівництва, проте забезпечує суттєву економію бюджетних коштів у довгостроковій перспективі за рахунок нижчих витрат на опалення, електроенергію та технічне обслуговування.

Четвертою особливістю є поєднання ресурсозбереження з розвитком місцевої економіки. Використання альтернативних технологій може стати не лише інструментом відновлення, а й чинником формування нових виробничих ніш у громадах і регіонах. Йдеться про виробництво будівельних матеріалів з вторинної сировини, монтаж сонячних станцій, сервісне обслуговування теплових насосів, виготовлення модульних конструкцій, переробку будівельних відходів, впровадження енергоаудиту, цифровий моніторинг споживання ресурсів. Таким чином, ресурсозберігаючі технології можуть створювати додану вартість, робочі місця та передумови для розвитку малого й середнього бізнесу.

П'ятою особливістю є необхідність адаптації технологій до типу території. Для великих міст актуальними є системи енергоменеджменту будівель, модернізація тепломереж, електротранспорт, переробка відходів, цифрове управління інфраструктурою. Для малих міст і селищ - автономні енергетичні рішення, біоенергетика, локальні системи водопостачання, енергоефективне освітлення, модульні соціальні об'єкти. Для сільських і гірських громад - використання біомаси, малих сонячних станцій, енергоефективного житла, локальних систем очищення води, ощадного використання земельних і лісових ресурсів. Отже, універсальної технологічної моделі для всіх територій не існує; потрібна диференціація залежно від ресурсної бази, масштабу руйнувань, фінансової спроможності та просторового положення громади.

Шостою особливістю є інтеграція ресурсозберігаючих технологій у промислове відновлення. Green Industrial Recovery Programme for Ukraine 2024–2028, підготовлена UNIDO, передбачає підтримку переходу приватного сектору до зеленої та циркулярної економіки, розвиток промислової енергоефективності, декарбонізацію, формування виробничих потужностей і ланцюгів постачання для енергоефективної реконструкції житла. Це свідчить про те, що післявоєнне відновлення має поєднувати інфраструктурну реконструкцію з модернізацією промислової бази країни [2].

Сьомою особливістю є важливість цифрового супроводу ресурсозбереження. Без системного моніторингу неможливо оцінити фактичний ефект від впровадження технологій. Тому громади повинні поступово переходити до цифрових систем енергоменеджменту, відкритих баз даних про споживання ресурсів, електронного обліку витрат води й тепла, геоінформаційного планування інфраструктури, цифрових паспортів будівель і моніторингу

викидів. Цифровізація дає змогу не лише контролювати витрати, а й обґрунтовувати потребу у фінансуванні, залучати донорські кошти та демонструвати прозорість використання ресурсів.

У практичному вимірі використання альтернативних ресурсозберігаючих технологій при повоєнному відновленні доцільно здійснювати за такими напрямками.

Перший напрям – енергоефективне відновлення житлового фонду. Він передбачає термомодернізацію будівель, утеплення фасадів, заміну вікон і дверей, модернізацію систем опалення, встановлення індивідуальних теплових пунктів, використання теплових насосів і сонячних панелей. Особливо важливим є те, щоб нове житло для постраждалих осіб, ветеранів, внутрішньо переміщених осіб і молодих сімей будувалося за вищими стандартами енергоефективності.

Другий напрям – ресурсозберігаюче відновлення критичної інфраструктури. Лікарні, школи, заклади соціального захисту, водоканали, котельні та адміністративні будівлі мають поступово отримувати автономні або резервні джерела енергії, системи накопичення, енергоощадне обладнання, LED-освітлення, автоматизоване управління споживанням тепла й електроенергії. Це підвищить їхню стійкість до надзвичайних ситуацій.

Третій напрям – циркулярне використання будівельних матеріалів. Повоєнне відновлення супроводжуватиметься значним обсягом будівельних відходів. Частина цих матеріалів може бути повторно використана після сортування, очищення та переробки. Це дасть змогу зменшити навантаження на полігони, скоротити потребу в первинній сировині, здешевити окремі види робіт і сформувати новий сегмент локального бізнесу.

Четвертий напрям – водозбереження та повторне використання водних ресурсів. Для громад, які стикаються з пошкодженням мереж водопостачання, дефіцитом якісної води або високими втратами у мережах, актуальними є технології очищення, повторного використання технічної води, збору дощової води, модернізації насосного обладнання, виявлення витоків і цифрового обліку споживання [3].

П'ятий напрям – зелена модернізація комунального господарства. Йдеться про енергоефективне вуличне освітлення, оптимізацію маршрутів громадського транспорту, електротранспорт, сортування й переробку відходів, компостування органічних залишків, модернізацію котельень, використання місцевих видів біопалива. Такі рішення мають безпосередній вплив на бюджетну економію громад.

Водночас упровадження альтернативних ресурсозберігаючих технологій супроводжується низкою обмежень. Серед них - висока початкова вартість обладнання, нестача кваліфікованих кадрів, обмежена інституційна спроможність громад, слабка підготовка проєктної документації, нерівномірний доступ до фінансування, недостатній рівень енергетичного аудиту, фрагментарність даних про стан інфраструктури. Для подолання цих бар'єрів необхідно поєднувати державну підтримку, міжнародне фінансування, місцеві програми, державно-приватне партнерство, навчання фахівців і технічну допомогу громадам.

Отже, альтернативні ресурсозберігаючі технології при повоєнному відновленні мають розглядатися не як додатковий екологічний компонент, а як базовий інструмент формування нової моделі розвитку України. Їхнє використання дає змогу одночасно вирішувати завдання відновлення інфраструктури, зниження енергетичної залежності, скорочення бюджетних витрат, розвитку місцевої економіки, підвищення безпеки громад і наближення до стандартів Європейського Союзу.

Повоєнне відновлення України створює унікальне вікно можливостей для переходу від ресурсоємної моделі розвитку до моделі енергоефективної, циркулярної та технологічно стійкої економіки. Альтернативні ресурсозберігаючі технології повинні стати невід'ємною складовою реконструкції житла, критичної інфраструктури, комунального господарства, промисловості та соціальних об'єктів. Їхня ефективність визначатиметься не лише технічними характеристиками, а й здатністю громад інтегрувати такі рішення у стратегії розвитку, програми відновлення, бюджетне планування та систему цифрового моніторингу.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення методики оцінювання ресурсозберігаючого потенціалу територіальних громад, яка враховуватиме енергетичну

автономність, рівень втрат ресурсів, готовність інфраструктури до модернізації, доступність відновлюваних джерел енергії, інституційну спроможність і очікуваний соціально-економічний ефект від упровадження технологій.

1. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>

2. Резильєнтність ендегенного розвитку регіонів в умовах глобальних викликів та шоків: монографія. НАН України. ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України»; наук. редактор М.І. Мельник. Львів, 2024.

3. Екотех (2024). Альтернативні джерела енергії: все, що потрібно знати. URL: <https://www.ecotech.ua/alternatyvni-dzherela-energiyi-vse-shho-potribno-znaty/>

**Лех Галина**  
*Національний лісотехнічний університет України*  
**Васькович Христина**  
*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ТУРИСТИЧНОЇ СФЕРИ В УМОВАХ ВОЄННОЇ КРИЗИ**

Публічне управління екологічною безпекою туристичної сфери в умовах воєнної кризи набуває особливого значення через глибоку зміну умов функціонування туризму в Україні. Воєнні дії вплинули не лише на туристичну інфраструктуру, транспортну доступність і попит на подорожі, а й на природні ресурси, без яких розвиток рекреаційної діяльності втрачає практичну основу. Забруднення ґрунтів і вод, мінування територій, руйнування лісових масивів, пошкодження природних ландшафтів, пожежі, зниження біорізноманіття та обмеження доступу до окремих рекреаційних зон формують нові вимоги до державної, регіональної й місцевої політики у сфері туризму.

Туристична сфера в умовах війни функціонує у нерівномірному просторовому середовищі. Частина територій через бойові дії, окупацію, руйнування або мінну небезпеку фактично втратила можливість приймати туристів. Водночас західні та окремі центральні області отримали додаткове рекреаційне навантаження через внутрішній туризм, релокацію населення та зростання попиту на відпочинок у відносно безпечних регіонах. Для Карпатського регіону посилення туристичних потоків означає додатковий тиск на водні ресурси, лісові екосистеми, гірські маршрути, транспортну мережу, систему поводження з відходами та комунальну інфраструктуру громад.

Екологічна безпека у туристичній сфері охоплює не лише охорону довкілля, а й здатність органів публічної влади попереджати ризики, контролювати навантаження на природні території, забезпечувати безпечність маршрутів і надавати достовірну інформацію відвідувачам. Якість води, стан ґрунтів, збереженість ландшафтів, рівень антропогенного навантаження, наявність укриттів, стан доріг і доступність медичної чи рятувальної допомоги стають складовими управлінського рішення щодо використання туристичної території. І. В. Єрко, досліджуючи сталий розвиток туризму, наголошує на потребі узгодження економічної вигоди, соціальних потреб населення та екологічних обмежень. Для воєнного періоду така позиція має практичне значення, адже громади прагнуть підтримувати туристичну активність як джерело доходів, однак надмірне навантаження без екологічного контролю може погіршити стан природних ресурсів і знизити довгострокову привабливість територій [1, с.7]. І. В. Замула підкреслює подвійний вплив туризму на довкілля: за належної організації він може підтримувати природоохоронні цілі, але за відсутності контролю спричиняє забруднення води,

повітря, земель, деградацію ґрунтів і лісів [2, с.3]. У контексті воєнної кризи наведена думка особливо важлива, оскільки екологічні втрати від бойових дій можуть посилюватися неконтрольованим рекреаційним навантаженням у відносно безпечних регіонах.

В. Л. Остропольський звертає увагу на потребу правового забезпечення екологічного туризму, екологічної політики для туристичних компаній, підтримки біорізноманіття, екопросвіти відвідувачів і мінімізації забруднення [3, с.293]. У межах публічного управління воєнного періоду зазначені положення доцільно розглядати як підґрунтя для запровадження чітких правил використання природних територій, контролю за туристичними маршрутами та відповідальності суб'єктів туристичного бізнесу за екологічні наслідки діяльності. І. Є. Смик та Л. М. Архипова на матеріалах Івано-Франківської області обґрунтовують зв'язок між туристичною активністю і забрудненням довкілля, зокрема водних ресурсів. Їхні висновки підтверджують потребу регіональної екологічної політики, спрямованої на контроль туристичного навантаження, моніторинг стану водних об'єктів, розвиток природоохоронної інфраструктури та екологічну відповідальність учасників туристичного ринку [4, с.190].

За даними Державного агентства розвитку туризму України, у 2025 році обсяг сплачених податків у сфері туризму становив 4 426,2 млн грн, що на 50,6 % більше, ніж у 2024 році. Наведена динаміка свідчить про поживавлення туристичної сфери, однак водночас посилює потребу в екологічному контролі, оскільки зростання туристичних потоків створює додаткове навантаження на природні ресурси, транспортну мережу, систему поводження з відходами й комунальну інфраструктуру громад [5]. На державному рівні сучасна ситуація потребує переходу від фрагментарного реагування до системного управління ризиками. Міндовкілля фіксує екологічні збитки, пов'язані з війною, ДСНС координує питання мінної безпеки й реагування на надзвичайні ситуації, ДАРТ підтримує розвиток туризму та просування безпечних напрямів, а місцеві громади відповідають за просторове планування, благоустрій і стан локальної інфраструктури. Проблема полягає у потребі узгодити названі напрями в єдину управлінську логіку: перед відкриттям або популяризацією туристичних маршрутів має оцінюватися не лише привабливість локації, а й екологічний стан території, наявність безпечного доступу, рівень антропогенного навантаження, готовність служб реагування та спроможність громади обслуговувати туристичний потік без шкоди для довкілля. UNDP також підкреслює, що вибухонебезпечне забруднення територій залишається масштабною перешкодою для відновлення України, а гуманітарне розмінування має ключове значення для безпеки населення й економічного відновлення.

В умовах воєнної кризи особливого значення набуває координація між органами державної влади, військовими адміністраціями, органами місцевого самоврядування, природоохоронними установами, рятувальними службами та суб'єктами туристичного бізнесу. Без належної взаємодії важко забезпечити своєчасне оновлення інформації про безпечність маршрутів, рівень екологічного ризику, доступність територій, стан природних ресурсів і допустимий рівень рекреаційного навантаження.

Проблемним залишається дефіцит єдиної інформаційної системи для оцінювання екологічної та безпекової ситуації у туристичних дестинаціях. Громади часто мають обмежені ресурси для регулярного моніторингу якості води, стану ґрунтів, засмічення територій, пропускної спроможності маршрутів і впливу туристичних потоків на природні комплекси. Через недостатню кількість актуальних даних управлінські рішення можуть ухвалюватися із запізненням, коли екологічна проблема вже сформувалася.

З огляду на євроінтеграційний курс України, розвиток туристичної сфери має узгоджуватися з принципами сталого використання природних ресурсів, відповідального просторового планування, участі громад і зменшення негативного впливу на довкілля. В умовах війни названі орієнтири потребують доповнення безпековими інструментами: паспортизацією маршрутів, перевіркою територій на мінну небезпеку, цифровим інформуванням туристів, обмеженням доступу до екологічно вразливих зон і плануванням відновлення інфраструктури з урахуванням природоохоронних вимог.

Отже, публічне управління екологічною безпекою туристичної сфери в умовах воєнної кризи має спрямовуватися на поєднання туристичного розвитку, захисту природних ресурсів і безпеки населення. Найбільш доцільними напрямками виступають екологічний моніторинг туристичних територій, контроль рекреаційного навантаження, оновлення інформації про безпечність маршрутів, розвиток екологічної інфраструктури, посилення відповідальності туристичного бізнесу, участь громад у плануванні та запровадження цифрових інструментів управління ризиками.

1. Єрко, І. В. (2023). Сталий та безпечний розвиток туризму як один з критеріїв трансформації конкурентного потенціалу суб'єктів туристичної індустрії. *Підприємництво та інновації*, 29, 7–13.

2. Замула, І. В. (2023). Розвиток екологічного туризму в Україні. *Економіка, управління та адміністрування*, 2(104), 3–9.

3. Остропольський, В. Л. (2025). Правове забезпечення розвитку екологічного туризму в Україні: сучасний стан та перспективи. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*, 2(89), 293–298.

4. Смик, І. Є., & Архипова, Л. М. (2024). Виклики та перспективи забезпечення екологічної безпеки туризму Івано-Франківської області в контексті російсько-української війни. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: збірник матеріалів*, 190–191.

5. Державне агентство розвитку туризму України. (2026). *Публічний звіт Голови Державного агентства розвитку туризму України Наталії Табака за 2025 рік*. <https://tourism.gov.ua/blog/publichnyy-zvit-golovi-derzhavnogo-agentstva-rozvitku-turizmu-ukrayini-natali-tabaki-za-2025-rik>

**Максименко Владислав**  
*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*  
**Безсонний Віталій**  
*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*  
*Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця*

## **ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ SENTINEL-2 ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ІНДИКАЦІЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ**

Руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року стало подією, що різко змінила гідрологічний, ландшафтний і екологічний стан нижньої течії Дніпра. Наслідки катастрофи охопили не лише втрату значної частини водного дзеркала водосховища, а й оголення донних відкладів, перебудову руслово-заплавної структури, появу залишкових водойм та формування нових екологічних ризиків. В умовах воєнного стану значна частина цієї території залишається небезпечною або недоступною для регулярних польових робіт, тому дистанційне зондування Землі набуває значення базового інструменту оперативної екологічної індикації [1].

Метою дослідження було узагальнення можливостей відкритих даних Sentinel-2 для виявлення просторово-часової трансформації Каховського водосховища після руйнування греблі та оцінювання основних ознак післяаварійної перебудови поверхневого покриття. Особливу увагу приділено індикації відкритої водної поверхні, осушених донних відкладів і фотосинтетично активної рослинності, оскільки саме ці компоненти найвиразніше відображають перехід території від штучного водного об'єкта до мозаїчної руслово-заплавної системи.

Інформаційною основою роботи були мультиспектральні знімки Sentinel-2 MSI рівня L2A, отримані через Copernicus Data Space Ecosystem. Використання атмосферно скоригованих даних поверхневого відбиття дає змогу коректніше зіставляти сцени різних дат. Для аналізу обрано три ключові часові зрізи 2023 року: 25 травня – попередаварійний стан водосховища; 25 червня - стан на 19-й день після руйнування греблі; 3 жовтня - осінній період, придатний для індикації рослинного покриву на осушеному ложі. Просторова роздільність каналів B3, B4 і B8 Sentinel-2 становить 10 м, що є достатнім для дослідження великомасштабної трансформації акваторії та прилеглих ландшафтів [2].

Методичний підхід поєднував індексний, порівняльно-часовий, візуально-дешифрувальний і частотний аналіз. Для виділення відкритої водної поверхні застосовано нормалізований різницевий індекс води NDWI, чутливий до контрасту між зеленим та ближнім інфрачервоним діапазонами [3]. Для виявлення фотосинтетично активної рослинності використано NDVI, який відображає співвідношення відбиття у ближньому інфрачервоному та червоному діапазонах [4]. Порогове трактування індексів застосовувалося як індикативне, а не як остаточна площинна класифікація, оскільки на межі води, мокрого мулу, мілководдя і змішаних пікселів можливі спектральні неоднозначності.

Попередаварійна сцена від 25 травня 2023 року засвідчила просторову цілісність Каховського водосховища як великого штучного водного об'єкта. У природних кольорах акваторія простежувалася як суцільне водне дзеркало видовженої форми вздовж долини Дніпра. На NDWI-зображенні в межах основної акваторії переважали додатні значення індексу, характерні для відкритої водної поверхні. Прибережні ділянки, агроландшафти, лісосмуги й населені пункти мали нижчі або від'ємні значення NDWI та відрізнялися від водної поверхні за спектральною структурою.

Післяаварійна сцена від 25 червня 2023 року показала принципово іншу просторову організацію території. Суцільне водне дзеркало було замінене мозаїкою активного русла Дніпра, локальних залишкових водойм, перезволожених ділянок і великих площ оголених донних відкладів. Додатні значення NDWI зберігалися переважно в межах руслових форм, понижень рельєфу та фрагментів залишкової водної поверхні. Натомість значна частина території, яка у травні класифікувалася як вода, у червні відповідала близьким до нуля або від'ємним значенням NDWI. Це свідчить не лише про зменшення площі відкритої води, а й про втрату водосховищем попередньої просторової цілісності.

Осіння сцена від 3 жовтня 2023 року дала змогу зафіксувати подальший етап післяаварійної трансформації – появу рослинного покриву на частині осушеного ложа. Додатні значення NDVI були виявлені на ділянках, які до руйнування греблі перебували під водою, а в червні переважно відповідали оголеним або перезволоженим донним відкладами. Просторово ці ділянки формували нерівномірну мозаїку: інтенсивніше заростання спостерігалось поблизу залишкових водойм, руслових форм і понижень, де довше зберігалось зволоження. Частотний розподіл NDVI підтвердив зміщення частини пікселів у додатний діапазон, що узгоджується з появою фотосинтетично активної рослинності.

Отримані результати корелюють із висновками сучасних досліджень, у яких підкреслено придатність супутникових даних для оперативного геомоніторингу наслідків руйнування Каховської греблі [5]. Водночас інтерпретація NDVI потребує обережності: індекс фіксує наявність фотосинтетично активного покриву, але не дає змоги самостійно визначити видовий склад, фітоценотичну структуру або стабільність рослинних угруповань. Тому зафіксовані зміни доцільно трактувати як ранньосукцесійне заростання або піонерну рослинну колонізацію осушених донних субстратів.

Екологічне значення цієї трансформації є неоднозначним. З одного боку, поява рослинності може бути передумовою стихійного відновлення окремих заплавлених, лучних і болотних біотопів, історично характерних для нижнього Дніпра. З іншого боку, оголення донних відкладів супроводжується ризиками вторинного забруднення, пилового перенесення, локального евтрофування залишкових водойм, пожежної небезпеки та неконтрольованої

ландшафтної перебудови. Такі процеси мають розглядатися як складова ширшого комплексу екологічних наслідків воєнного руйнування водної інфраструктури [6].

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості швидко документувати масштабні гідроекологічні зміни без безпосереднього перебування дослідників у небезпечній зоні. Sentinel-2 забезпечує відкритість даних, регулярність знімання та достатню деталізацію для аналізу великих водних об'єктів, проте має обмеження, пов'язані з хмарністю, атмосферними умовами, просторовою роздільністю та неоднозначністю спектрального відгуку на перезволожених субстратах. Для підвищення надійності моніторингу доцільно поєднувати часові ряди NDWI і NDVI з радарними даними Sentinel-1, цифровими моделями рельєфу, гідрохімічною інформацією та, за можливості, вибірковою наземною валідацією.

Таким чином, використання даних Sentinel-2 у поєднанні з індексами NDWI та NDVI дає змогу індикативно, відтворювано й безпечно простежувати післяаварійну трансформацію Каховського водосховища. У 2023 році встановлено послідовний перехід від суцільної відкритої водної поверхні до мозаїки руслових, залишково-водних, оголених і вегетованих ділянок. Такий підхід може бути використаний для подальшого екологічного моніторингу територій, що зазнали воєнно-техногенних або гідроекологічних катастроф, а також для інформаційного забезпечення рішень у сфері безпеки довкілля.

1. United Nations Environment Programme. (2023). Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach, Ukraine, 2023. Nairobi: UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/rapid-environmental-assessment-kakhovka-dam-breach-ukraine-2023>

2. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

3. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

4. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

5. Lischenko, L., & Filipovych, V. (2024). Operational satellite geomonitoring of the consequences of the destruction of the Kakhovka hydroelectric power plant dam. Ukrainian Journal of Remote Sensing, 11(1), 21–31. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257>

6. Shumilova, O., Sukhodolov, A., Osadcha, N., et al. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. Science, 387(6739), 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>

**Мельник Наталія, Різничук Надія**  
*Карпатський національний університет імені Василя Стефаника*

## **ФІТОХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ І БІОЛОГІЧНА АКТИВНІСТЬ МІСЦЕВИХ РОСЛИН ЯК ДЖЕРЕЛО КОСМЕТИЧНИХ І ФАРМАКОЛОГІЧНИХ ПРЕПАРАТІВ**

У роботі досліджено фітохімічний склад і біологічну активність місцевих лікарських рослин дендрологічного парку «Дружба» загальнодержавного значення Карпатського національного університету імені Василя Стефаника. Проведено аналіз основних груп

біологічно активних речовин, зокрема флавоноїдів, ефірних олій, фенольних сполук та дубильних речовин. Встановлено їх значний вміст у таких рослинах, як *Origanum vulgare* L., *Salvia officinalis* L., *Calendula officinalis* L. та *Arnica montana* L. (загальний вміст флавоноїдів становив у межах 2,1 – 4,8 %, ефірних олій – 0,5 – 2,3 % залежно від виду). Показано, що досліджувані види проявляють виражену антиоксидантну, протизапальну та антимікробну активність ( інгібування вільних радикалів – до 65 – 78 %). Обґрунтовано перспективи використання місцевих рослин як джерел сировини для фармакологічних і косметичних препаратів.

У сучасних умовах розвитку фармацевтичної та косметологічної галузей особливої актуальності набуває пошук природних джерел біологічно активних речовин. За даними сучасних досліджень, близько 60–70 % лікарських засобів рослинного походження містять активні компоненти, виділені з лікарських рослин. Одним із перспективних напрямів є дослідження місцевих лікарських рослин, які можуть слугувати основою для створення ефективних і безпечних лікарських та косметичних засобів.

Фітохімічний аналіз рослинної сировини дозволяє визначити якісний та кількісний склад біологічно активних речовин, що є ключовим для оцінки їх фармакологічної та косметологічної цінності. Особливу увагу привертають такі групи сполук, як флавоноїди, алкалоїди, фенольні сполуки, терпеноїди, дубильні речовини та ефірні олії, які зумовлюють широкий спектр біологічної активності рослин [1, 2]. За літературними даними, вміст фенольних сполук у лікарських рослинах може варіювати в межах 1,5–6,0 %, що визначає їх антиоксидантні властивості.

Об'єктом дослідження є місцеві лікарські рослини, що зростають на території дендрологічного парку «Дружба» Івано-Франківської області. Дана територія характеризується сприятливими природними умовами, що забезпечують накопичення рослинами значної кількості біологічно активних речовин; за попередніми оцінками, їх вміст може перевищувати середні показники для аналогічних видів на 10–15 % [3].

Метою роботи є проведення фітохімічного аналізу окремих видів лікарських рослин та оцінка їх біологічної активності як потенційних джерел косметичних і фармакологічних препаратів.

У процесі дослідження було проаналізовано такі рослини, як *Origanum vulgare* L. (материнка звичайна), *Salvia officinalis* L. (шавлія лікарська), *Calendula officinalis* L. (календула лікарська) та *Arnica montana* L. (арніка гірська). Вибір цих видів обумовлений їх широким використанням у народній та офіційній медицині, а також високим вмістом біологічно активних речовин (до 3–5 % флавоноїдів та до 2 % ефірних олій)..

Фітохімічний аналіз здійснювався з використанням якісних реакцій на виявлення основних груп сполук, а також кількісних методів визначення їх вмісту в рослинній сировині [4]. У результаті дослідження встановлено, що досліджувані рослини містять значну кількість флавоноїдів і фенольних сполук, які проявляють виражену антиоксидантну активність.

Зокрема, у материнці та шавлії виявлено високий вміст ефірних олій ( до 2,0 – 2,3 %), що забезпечує їх антисептичні, протизапальні та бактерицидні властивості. Календула характеризується значним вмістом каротиноїдів ( до 0,3 – 0,6 %) і флавоноїдів, що сприяють регенерації тканин і широко використовуються у косметології. Арніка гірська містить біологічно активні сполуки (сесквітерпенові лактони до 0,2–0,4 %) , які зумовлюють її протизапальну та знеболювальну дію [2, 5].

Біологічна активність досліджуваних рослин проявляється у вигляді антиоксидантної, антимікробної, протизапальної та регенеративної дії ( зона інгібування мікроорганізмів становила в середньому 10–18 мм). Це визначає їх перспективність для використання у створенні лікарських препаратів та косметичних засобів природного походження.

Отримані результати підтверджують, що місцеві лікарські рослини є цінним джерелом біологічно активних речовин і можуть бути ефективно використані у фармацевтичній та косметологічній практиці.

Перспективи подальших досліджень полягають у детальному кількісному аналізі біологічно активних речовин, а також у вивченні впливу екологічних факторів на їх накопичення. Це дозволить розширити можливості використання рослинної сировини та підвищити ефективність створення нових препаратів.

Отже, фітохімічний аналіз і дослідження біологічної активності місцевих рослин є важливим напрямом сучасної науки, що сприяє розвитку медицини, фармакології та косметології.

1. Державна фармакопея України. (2015). *Державна фармакопея України*. (2-ге вид.). ДП «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів».
2. Ковальов, В. М. (2014). *Фармакогнозія*. НФаУ.
3. Кузьменко, А. В. (2020). *Фітохімія лікарських рослин*.
4. *Проект організації території дендрологічного парку «Дружба»*. (2020).
5. Ткаченко, І. П. (2016). *Біологічно активні речовини рослин*.

**Миленська Мирослава, Цепенда Ігор, Стефанюк Роман, Наливайчук Андрій**  
*Карпатський національний університет імені Василя Стефаника*

## **ВИСОКОГІРНІ НАУКОВІ ХАБИ ЯК ЕЛЕМЕНТ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА БЕЗПЕКОВОЇ СТІЙКОСТІ: РІЛЬ МННЦ «ОБСЕРВАТОРІЯ» В УМОВАХ СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ**

Карпатський регіон є одним із ключових природних макрорегіонів Європи, що виконує фундаментальні кліматорегулюючі, гідрологічні та біосферні функції. Він є важливим водозбірним басейном, центром біорізноманіття та кліматоутворюючим фактором для значної частини Центральної та Східної Європи. У цьому контексті стабільність Карпатської екосистеми безпосередньо пов'язана з екологічною безпекою ширшого європейського простору.

Водночас сучасні глобальні процеси, зокрема зміна клімату, інтенсифікація антропогенного навантаження, урбанізація та, особливо, воєнні дії на території України, суттєво підвищують рівень екологічних ризиків. Війна стала чинником масштабної трансформації довкілля, що проявляється у забрудненні атмосферного повітря, деградації природних екосистем, порушенні біогеохімічних циклів та формуванні нових транскордонних екологічних загроз.

У цих умовах ключового значення набуває формування сучасної, інтегрованої системи екологічного моніторингу, здатної забезпечувати не лише фіксацію стану довкілля, але й прогнозування змін та підтримку прийняття управлінських рішень. Особливу роль у цій системі відіграють високогірні наукові хаби як платформи для здійснення фонових, довготривалого та просторово репрезентативного моніторингу.

Одним із таких об'єктів є Міжнародний навчально-науковий центр «Обсерваторія» Карпатського національного університету імені Василя Стефаника та Варшавського університету, розташований на вершині г. Піп Іван Чорногірський (2028 м н.р.м.) у межах Карпатського національного природного парку. Високогірне положення Обсерваторії забезпечує унікальні умови для дослідження атмосферних процесів, транскордонних переносів повітряних мас та реакцій екосистем на кліматичні й антропогенні впливи.

На базі центру функціонує сучасна автоматизована метеорологічна станція, яка забезпечує безперервний збір даних щодо температури, вологості повітря, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру, кількості опадів, сонячної радіації та інших параметрів. Поєднання метеорологічних і екологічних даних формує високоточну інформаційну основу для аналізу стану атмосфери та виявлення довгострокових тенденцій.

Одним із ключових напрямів розвитку центру є створення повноцінної системи моніторингу якості атмосферного повітря. У сучасних умовах особливої актуальності набуває оцінка транскордонних переносів забруднюючих речовин, включаючи продукти горіння, дрібнодисперсні частки, токсичні сполуки та потенційно небезпечні аерозолі. Доукомплектування наявної інфраструктури аналітичним обладнанням для визначення оксидів азоту, діоксиду сірки, озону, формальдегіду, PM<sub>2.5</sub> і PM<sub>10</sub>, а також біологічних аерозолів дозволить забезпечити відповідність досліджень європейським стандартам і вимогам директив ЄС.

Особливого значення ці дослідження набувають у контексті воєнних дій, які супроводжуються масштабними викидами забруднюючих речовин у атмосферу. Високогірні моніторингові пункти, такі як МННЦ «Обсерваторія», можуть виконувати функції раннього виявлення та оцінки поширення таких забруднень на регіональному і транскордонному рівнях. Це дозволяє формувати науково обґрунтовані сценарії розвитку екологічної ситуації та забезпечувати інформаційну підтримку систем цивільного захисту.

Важливим компонентом функціонування Обсерваторії є розвиток цифрової інфраструктури збору, обробки та візуалізації даних у режимі реального часу. Створення відкритих екологічних платформ даних дозволяє інтегрувати результати досліджень у систему прийняття управлінських рішень, а також забезпечує доступ до інформації для наукової спільноти, органів влади та громадськості.

Автономність функціонування забезпечується інтеграцією відновлюваних джерел енергії – сонячної та вітрової генерації – у поєднанні з системами накопичення, що дозволяє створити незалежну енергетичну інфраструктуру високогірного наукового хабу.

Окрім атмосферного моніторингу, центр має значний потенціал у сфері дослідження біорізноманіття та оцінки стану високогірних екосистем. Чорногірський масив є унікальною природною територією з високим рівнем ендемізму та значною часткою рідкісних і реліктових видів. Дослідження динаміки рослинних угруповань, верхньої межі лісу, реакцій біогеоценозів на кліматичні зміни та антропогенне навантаження є важливими для розробки стратегій адаптації та збереження екосистем.

Інтеграція МННЦ «Обсерваторія» до міжнародних мереж спостережень (зокрема Всесвітньої метеорологічної організації, Європейської агенції довкілля та мережі Eionet) дозволить забезпечити порівнянність даних, підвищити їхню якість і включити Карпатський регіон до загальноєвропейської системи екологічного моніторингу. Це також сприятиме імплементації європейських стандартів у сфері охорони довкілля та розвитку наукової співпраці.

Важливим етапом розвитку МННЦ «Обсерваторія» є створення повноцінного стаціонарного поста екологічного моніторингу, який являє собою комплексну систему збору, обробки та передачі даних про стан довкілля. Зокрема, передбачено впровадження спеціалізованого модульного контейнерного поста, оснащеного системами відбору проб атмосферного повітря, газоаналізаторами для визначення оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) та діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>), а також інфраструктурою для безперервної передачі даних.

Функціонування такого поста забезпечується автономними системами енергоживлення, контролю мікроклімату, безпеки та захисту обладнання, що дозволяє здійснювати вимірювання у широкому діапазоні кліматичних умов високогір'я. Використання сучасних аналітичних методів (зокрема хемілюмінесцентного та УФ-флуоресцентного аналізу) забезпечує високу точність і чутливість визначення концентрацій забруднюючих речовин на рівні ppb.

Інтеграція системи збору та передачі даних (даталогтери, мережеві модулі, спеціалізоване програмне забезпечення) дозволяє здійснювати автоматизований моніторинг, накопичення, візуалізацію та аналіз екологічної інформації у режимі реального часу. Це створює основу для формування цифрової екологічної інфраструктури, здатної забезпечити як наукові дослідження, так і оперативну підтримку управлінських рішень у сфері охорони довкілля та безпеки.

Таким чином, високогірні наукові хаби, зокрема МННЦ «Обсерваторія», слід розглядати не лише як наукові об'єкти, але і як стратегічні елементи системи екологічної та безпекової

стійкості. Вони забезпечують отримання достовірних даних, необхідних для оцінки ризиків, прогнозування змін і прийняття ефективних управлінських рішень у сфері довкілля.

У контексті сучасних викликів, зокрема воєнних, їх роль виходить за межі наукової діяльності та набуває значення інструменту забезпечення екологічної безпеки, підтримки регіональної стабільності та інтеграції України у європейський екологічний простір.

1. Angurets, O., Khazan, P., & Kolesnykova, K. (2021). *Air quality management: From concept to implementation*. Arnika.

2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019, August 14). *Resolution No. 827 on some issues of state environmental monitoring in the field of air protection*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF>

3. Didukh, Y. P., Chornei, I. I., & Budzhak, V. V. (2016). *Climate-driven changes in vegetation of the Ukrainian Carpathians*.

4. Koltsov, M., & Shevchenko, L. (2018). *Air quality monitoring: Ukrainian and international experience*.

**Мисик Михайло**  
**Національний лісотехнічний університет України**  
**Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного**  
**Поберейко Богдан, Варениця Віталій**  
**Національний лісотехнічний університет України**

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ІНДЕКСУ РОСЛИННОСТІ NDVI ПОСТКАТАСТРОФІЧНОЇ ЕКОСИСТЕМИ**

Руйнування греблі Каховської гідроелектростанції у червні 2023 року стало однією з наймасштабніших техногенних та екологічних катастроф у Європі за останні десятиліття. Раптове спускання водосховища об'ємом понад 18 км<sup>3</sup> призвело до миттєвого оголення понад 2000 км<sup>2</sup> донних відкладень. Цей акт воєнного екоциду докорінно змінив гідрологічний режим регіону і створив безпрецедентний за просторовими масштабами "природний експеримент" з первинної екологічної сукцесії на величезних відкритих територіях [1–11].

Безпосередньо після катастрофи наукова спільнота та екологи висловлювали обґрунтовані побоювання щодо неминучого опустелювання осушеного дна, розвитку катастрофічної вітрової ерозії та формування токсичних пилових бур. Проте спостереження наступних років (2024–2025) виявили зовсім іншу траєкторію екологічного розвитку. Замість безплідної пустелі на колишньому дні водосховища розпочалося неочікувано стрімке формування піонерної рослинності – суцільних масивів вологолюбних видів, переважно білої верби (*Salix alba*) [1]. Ця територія почала швидко перетворюватися на високопродуктивну наземну екосистему, здатну функціонувати як потужний поглинач вуглецю.

Моніторинг та вивчення цієї унікальної посткатастрофічної екосистеми традиційними польовими (наземними) методами є неможливий через активні бойові дії, щільне мінування території та високі ризики для життя дослідників. За таких умов дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) залишається єдиним безпечним та об'єктивним інструментом. Однак, традиційний візуальний аналіз супутникових знімків або просте усереднення вегетаційних індексів не дають змоги кількісно оцінити фенологію (життєвий цикл) цієї нової екосистеми: визначити старт сезону вегетації (Start of Season, SOS), пік біомаси та тривалість активного росту.

Для кількісного аналізу таких динамічних процесів необхідний перехід до хмарних (cloud-native) технологій обробки великих даних та математичного моделювання. **Метою даного дослідження** є реконструкція та кількісний аналіз фенологічної динаміки піонерних лісів на осушеному дні Каховського водосховища за допомогою гібридного хмарного підходу. Використовуючи часові ряди індексу NDVI (Sentinel-2 L2A) та застосовуючи подвійну логістичну модель для їх апроксимації, тут пропонується надійний алгоритм ідентифікації фенологічних метрик. Запропонована інтеграція Google Earth Engine та локального середовища Python дозволяє обійти обчислювальні обмеження стандартних платформ і забезпечує високу точність оцінки процесу відновлення екосистем, змінених через бойові дії.

Для досягнення поставленої мети застосовано гібридний хмарний конвеєр обробки даних, розроблений для кількісної оцінки фенології рослинності на осушеному дні Каховського водосховища. Робочий процес поділено на чотири основні етапи: виділення території дослідження, збір та попередня обробка супутникових даних, хмарна просторова редукція та локальне математичне моделювання часових рядів.

Основним джерелом даних стали мультиспектральні знімки місії Sentinel-2 (Level-2A), які забезпечують просторову роздільну здатність 10 метрів та атмосферну корекцію (Bottom of Atmosphere, BOA).

Для точної просторової ізоляції зони первинної сукцесії було створено маску новоутвореного суходолу. За допомогою платформи Google Earth Engine (GEE) контур історичного водосховища (визначений за індексом NDWI до руйнування греблі у 2022 році) був використаний виключно як територіальна межа. З цього загального полігону було виключено залишкове русло річки Дніпро. Таким чином, подальший аналіз проводився виключно на оголених донних відкладеннях, які стали субстратом для формування піонерної рослинності (рис. 1).



Рис. 1. Маска (полігон) для ідентифікації новоутвореного суходолу

Аналізувався період 2024–2025 років, що відповідає етапу активного формування лісового покриву. Для уникнення похибок застосовувалося строге піксельне фільтрування на основі шару класифікації сцен (Scene Classification Layer, SCL), де залишалися лише класи "рослинність" та "голий ґрунт".

Для кожного очищеного знімка обчислювався нормалізований відносний індекс рослинності NDVI:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}, \quad (1)$$

де B8 – канал ближнього інфрачервоного діапазону (NIR),  
B4 – канал червоного видимого світла

Для побудови репрезентативної фенологічної кривої, стійкої до прогалин у даних, часові ряди NDVI за період 2024–2025 років були згорнуті в єдиний синтетичний 365-денний вегетаційний цикл. Такий підхід дав змогу об'єднати всі доступні безхмарні спостереження,

формуючи суцільний масив даних для ідентифікації типового річного профілю нової екосистеми.

Розроблений конвеєр обробки даних ДЗЗ використовує GEE для просторової редукції (ee.Reducer.mean) пікселів у середнє значення NDVI для всього ізольованого контуру суходолу на кожен доступну дату. Отриманий одновимірний часовий ряд експортувався у середовище Google Colab (Python) для уникнення обчислювальних обмежень GEE у процесі складного нелінійного моделювання.

Для згладжування згорнутого синтетичного часового ряду та точного визначення фенологічних фаз у середовищі Python (scipy.optimize) застосовувалася підгонка подвійної логістичної функції (рис. 2) методом нелінійних найменших квадратів:

$$NDVI(t) = w + (m - w) \cdot \frac{1}{1 + e^{-k_s(t-S)}} + \frac{1}{1 + e^{-k_a(t-A)}} - 1, \quad (2)$$

де  $t$  – день року,  $t \in (1, 365)$ ,

$w$  – фоновий рівень NDVI у період зимового спокою;

$m$  – пік вегетаційного розвитку лісу;

$S$  – точка перегину першої (висхідної) частини логістичної кривої, день максимальної швидкості розпускання листя;

$A$  – точка перегину другої (низхідної) частини кривої, день максимальної швидкості деградації хлорофілу та опадання листя;

$k_s$  – коефіцієнт нахилу дотичної в точці  $S$ , швидкість весняного росту;

$k_a$  – коефіцієнт нахилу дотичної в точці  $A$ , швидкість осіннього спаду.

Як видно з рис. 2, застосований конвеєр "Google Earth Engine → Python → SciPy" демонструє високу ефективність для дистанційного моніторингу динаміки екосистем недоступних через бойові дії територій. Згортання дворічних часових рядів (Data Folding) дало змогу подолати проблему хмарності, а нелінійна оптимізація гарантувала високу стійкість до шумів в оптичних даних Sentinel-2.

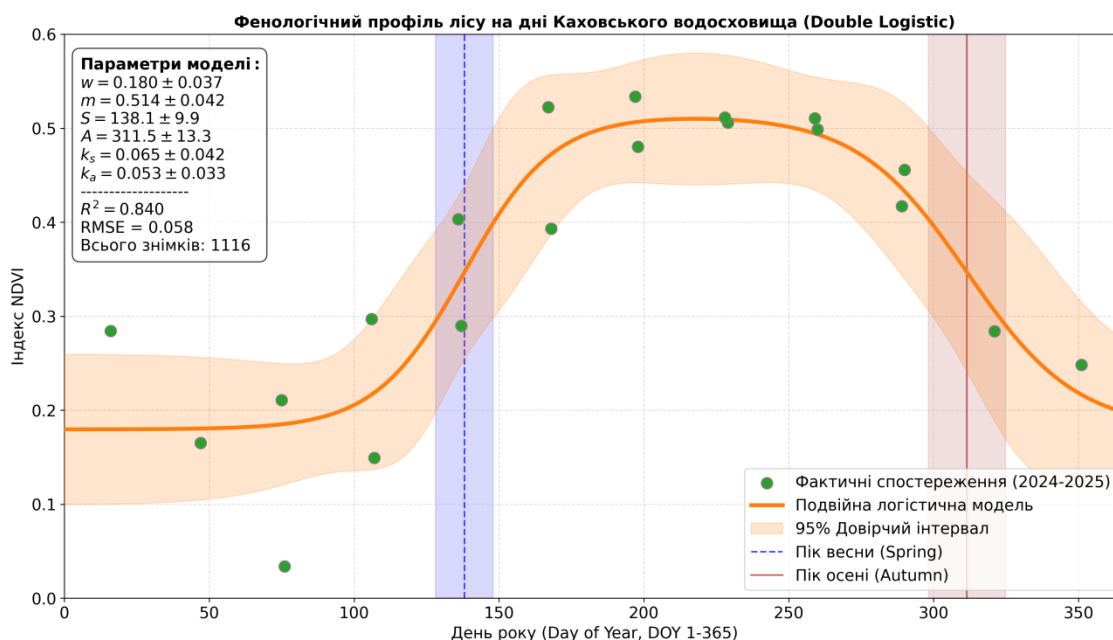


Рис. 2. Фенологічний профіль лісу на дні Каховського водосховища

Таким чином, гібридний хмарно-орієнтований аналіз часових рядів NDVI (Sentinel-2 L2A) із застосуванням подвійної логістичної функції дозволив точно реконструювати фенологічний профіль нової екосистеми на осушеному дні Каховського водосховища.

Встановлено, що пікові значення NDVI перевищують 0.51, старт вегетації (SOS) припадає на середину травня (DOY 138), а осіннє в'янення (EOS) – на початок листопада (DOY 312).

Тривалий вегетаційний період (близько 174 днів) підтверджує високу життєздатність та продуктивність новоутвореного лісу, відсутність критичного водного дефіциту та формування потужного природного поглинача вуглецю.

Застосована методологія згладжування та ідентифікації фенологічних метрик є надійним і відтворюваним інструментом для безконтактного екологічного моніторингу територій, що постраждали від воєнного екоциду та залишаються недоступними для наземних досліджень.

1. Дідух, Я., Мойсієнко, І., Кравченко, О., Муленко, М., Полянська, К., Чусова, О., & Гетьман, П. (2025). Початкові етапи формування заплавних лісів днища Каховського водосховища та прогноз їхнього розвитку. <https://doi.org/10.18523/2617-4529.2025.8.70-80>

2. Глух, О. С., Заяць, Я. Р., Симканич, О. І., Мільович, І. М., Шварц, Р. Р., & Молнар-Бабіля, Д. І. (2025). Використання даних Google Earth Engine для моніторингу евтрофікаційних процесів у водосховищах Закарпаття. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія "Хімія"*, 54(2), 120-126. <https://doi.org/10.24144/2414-0260.2025.2.120-126>

3. Ільєнко, Т. В. ЗАСТОСУВАННЯ ГІС/ДЗЗ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ НАСЛІДКІВ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС НА СТАН АГРОРЕСУРСІВ. РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: Голова, 77.

4. Стадніченко, С. М., Сомар, Н. П., Лобасов, О. П., & Алексєєнкова, М. В. (2025). Аналіз просторових закономірностей розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів засобами ГІС у зоні впливу колишнього Каховського водосховища. *Геологічний журнал*, (4), 77-94. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.347039>

5. Кавац, О. О., Кавац, Ю. В., Сергєєва, К. Л., & Рой, Д. М. (2026). ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КАРТУВАННЯ ВОДНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ. *Системні технології*, 1(162), 36-45. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-162-2026-04>

6. Lischenko, L., & Filipovich, V. (2024). Оперативний супутниковий геомоніторинг наслідків руйнування греблі Каховської гідроелектростанції. *Ukrainian journal of remote sensing*, 11(1), 21-31. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257>

7. Lischenko, L., Kozlova, A., & Andreiev, A. (2025). Mapping of the spatiotemporal transformations of the former Kakhovka reservoir bed after dam destruction using Sentinel-2 satellite imagery. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 12(4), 29–37. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296>

8. Mhanna, S., Halloran, L. J., Zwahlen, F., Asaad, A. H., & Brunner, P. (2023). Using machine learning and remote sensing to track land use/land cover changes due to armed conflict. *Science of the Total Environment*, 898, 165600. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165600>

9. Kussul, N., Shelestov, A., Yailymov, B., Yailymova, H., Lemoine, G., & Deininger, K. (2025). Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using machine learning applied to Sentinel satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 140, 104551. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104551>

10. Nigar A, Li Y, Jat Baloch MY, Alrefaei AF and Almutairi MH (2024) Comparison of machine and deep learning algorithms using Google Earth Engine and Python for land classifications. *Front. Environ. Sci.* [doi: 10.3389/fenvs.2024.1378443](https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1378443)

11. Krampe, F., Kreutz, J., & Ide, T. (2025). Armed conflict causes long-lasting environmental harms. *Environment and Security*. <https://doi.org/10.1177/27538796251323739>

## ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

Оцінка екологічних ризиків пилового забруднення атмосферного повітря в умовах урбанізованих і промислових територій це важлива складова моніторингу навколишнього середовища. У роботі Проаналізовано джерела утворення пилу, його дисперсний склад та вплив на здоров'я населення і довкілля. Наведено основні методи оцінювання ризиків, включаючи індекс забруднення повітря, коефіцієнти небезпеки та математичне моделювання розсіювання. Обґрунтовано необхідність комплексного підходу до моніторингу пилових аерозолів з використанням сучасних інформаційних технологій.

Пилове забруднення атмосферного повітря є однією з найбільш актуальних екологічних проблем сучасності. Особливу небезпеку становлять дрібнодисперсні частинки (PM10, PM2.5), які здатні проникати у дихальну систему людини та викликати серйозні захворювання. В умовах інтенсивного розвитку промисловості, транспорту та урбанізації рівень пилового навантаження постійно зростає.

Основними джерелами пилу є цементні заводи, гірничодобувні підприємства, транспорт, будівельна діяльність, спалювання палива та військові дії. В Україні проблема пилового забруднення особливо актуальна для промислових регіонів, таких як Дніпропетровська, Донецька, Львівська області.

Оцінка екологічних ризиків пилового забруднення є необхідною умовою для забезпечення екологічної безпеки та розробки ефективних природоохоронних заходів.

Пил являє собою аерозольну систему, що складається з твердих частинок різного розміру та хімічного складу. Найбільш небезпечними є: PM10 (частинки < 10 мкм) та PM2.5 (частинки < 2,5 мкм)

Чим менший розмір частинок, тим глибше вони проникають у легені. Частинки PM2.5 можуть потрапляти у кровоносну систему, викликаючи системні порушення організму.

Основні джерела пилового забруднення: промислові підприємства (цементні, металургійні); транспортні викиди; будівельні роботи; кар'єри та шахти; вторинне підняття пилу з поверхні доріг; наслідки бойових дій (руйнування інфраструктури).

Оцінка ризику включає визначення рівня небезпеки для здоров'я людини та екосистем. Серед таких критеріїв є коефіцієнт небезпеки (HQ), який визначається за залежністю:

$$HQ = \frac{C}{RfC} \quad (1)$$

де:  $C$  - фактична концентрація пилу;  $RfC$  – референтна концентрація (мкг/м³).

Якщо  $HQ > 1$  – існує ризик для здоров'я. Референтна це безпечна концентрація хімічної речовини в атмосферному повітрі, при щоденному інгаляційному впливі якої не очікується розвитку шкідливих ефектів у людини протягом тривалого часу (зазвичай протягом життя).  $RfC$  використовується як критерій порівняння при оцінці екологічного та гігієнічного ризику і відображає порогову концентрацію, нижче якої: організм здатний адаптуватися; не відбувається суттєвих функціональних порушень; відсутній ризик хронічних ефектів.

Важливим критерієм оцінки екологічного ризику є індекс забруднення атмосфери (ІЗА) - це інтегральний показник, який використовується для оцінки рівня забруднення повітря за сукупністю кількох шкідливих речовин. Він дозволяє узагальнити вплив різних поллютантів в одному числовому значенні та оцінити екологічний стан атмосферного повітря.

ІЗА широко застосовується в системах екологічного моніторингу України та використовується для порівняння рівнів забруднення між різними територіями.

Класичне вираження у формульній інтерпретації наведено нижче:

$$ІЗА = \sum_{i=1}^n (\frac{C_i}{ГДК_i}) \cdot K_i \quad (2)$$

де:  $C_i$  – середня концентрація  $i$ -того забруднювача ( $мг/м^3$ );  $ГДК_i$  – гранично-допустима концентрація  $i$ -того забруднювача;  $K_i$  – коефіцієнт токсичності;  $n$  – кількість забруднювачів.

Для моделювання поширення пилу застосовується гаусівська модель розсіювання:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}) \quad (3)$$

де:  $Q$  – інтенсивність викиду забрудника;  $u$  – швидкість вітру( $м/с$ );  $\sigma$  – параметри розсіювання.

Модель дозволяє прогнозувати концентрації пилу в залежності від відстані джерела забруднення.

Відомо, що пилові частинки викликають: захворювання дихальної системи; бронхіти та астму; серцево-судинні патології; алергічні реакції; підвищення смертності. Особливо вразливими є діти та люди похилого віку.

Значне навантаження створює пилове забруднення і на навколишнє середовище, що призводить до деградації ґрунтів; забруднення рослинності; зниження фотосинтезу; зміни кислотності середовища; накопичення важких металів.

Таким чином пилове забруднення атмосферного повітря є значним фактором екологічного ризику, що негативно впливає на здоров'я населення та стан довкілля. Найбільшу небезпеку становлять дрібнодисперсні частинки  $PM_{2.5}$ , які мають високу проникну здатність і токсичність. Оцінка ризику повинна базуватися на комплексному підході, що включає моніторинг, математичне моделювання та індексні методи.

Для підвищення екологічної безпеки необхідно впроваджувати сучасні технології очищення повітря, удосконалювати системи контролю та розширювати екологічні дослідження в умовах зростаючого антропогенного навантаження.

1. Бойченко, С., Козак, О., Андрішко, Ю., & Яринка, В. Особливості аерозольного забруднення атмосферного повітря  $PM_{2.5}$  та  $PM_{10}$  у м. Київ. *Biota. Human. Technology*. No. 3 (2025): BHT 3\_2025 /Anthropogenic transformation of ecosystems.

2. Olena I. Turos, Arina A. Petrosian, Tetiana P. Maremukha, Varvara V. Morhulova, Nina V. Brezitska, Inna V. Kobzarenko, Tetiana V. Tsarenok. assessment of ambient air pollution by particulate matter (pm10, pm2.5) and risk for human health caused by war actions/ 2023, *Wiadomości Lekarskie*, № 4, p. 738-744.

3. Stanislav Y. Adamenko, Liudmyla M. Arkhypova. Study of patterns of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  changes in the atmospheric air of Ivano-Frankivsk region/ Vol. 51 No. 3 (2024): *Environmental safety and natural resources* /

4. Grynchyshyn, N. Якість атмосферного повітря за вмістом твердих мікрочастинок ( $pm_{2.5}$ ) у містах України в умовах карантину та воєнного стану. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, №27, С.6-15.

5. Kozii I. Investigation of the influence of finely dispersed solid substances of the atmospheric air on humans / Ivan Kozii // *Environmental Problems*. – Lviv : Lviv Politechnic Publishing House, 2022. – Vol 7. – No 1. – P. 7–13.

## **ВІЙСЬКОВІ ДІЇ В УКРАЇНІ ТА ЇХ НАСЛІДКИ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ**

Безпека довкілля в Україні в умовах воєнного стану носить глобальну проблему породжену варварськими діями російської держави внаслідок бойових дій на нашій території. Існує серйозна загроза ядерної катастрофи через захоплення Запорізької атомної електростанції та знаходження на її території військовослужбовців російської федерації, озброєння та замінувавши місцевість, а також обстрілюючи з її території міста на іншому березі водосховища - Нікополь і Марганець.

З 4 березня 2022 року станція перебуває під російською окупацією, працює під наглядом МАГАТЕ, а її 6 реакторів (ВВЕР-1000) переведені у режим зупинки. Станція систематично зазнає блекаутів через пошкодження ліній живлення. Через військову діяльність росії, електроживлення власних потреб станції (циркуляційні насоси, системи керування реактором, насоси аварійного охолодження та вентиляція, які живляться від трансформаторів власних потреб або дизель-генераторів) з української сторони періодично переривалося, що ставило під загрозу охолодження ядерних реакторів. Російська корпорація "Росатом" оголосила про незаконне привласнення ЗАЕС, намагаючись організувати електропостачання з неї на окуповані росією території.

Російські військові погрожували підірвати блоки АЕС, і це могло би мати величезні наслідки для багатьох країн, у тому числі і для країни-агресора. Російська Федерація не бажає замислитись над тим, яку екологічну катастрофу вони можуть спричинити своїми божевільними діями. Там же є радіоактивні елементи, і у випадку аварії можливий їх викид у навколишнє середовище. Якщо таке станеться, то діяти потрібно буде в залежності від інтенсивності і величини аварії. А ми всі пам'ятаємо наслідки аварії на ЧАЕС.

Одна з головних причин негативного впливу військових дій на навколишнє середовище полягає у застосуванні різноманітних видів зброї та боєприпасів. Наприклад, використання хімічної, бактеріологічної та ядерної зброї може призвести до масового отруєння живих організмів та надовго залишити свої сліди. Крім того, конвенційна зброя також може негативно вплинути на навколишнє середовище через використання шкідливих матеріалів, які можуть бути складні для утилізації. Іншою причиною впливу військових дій на довкілля є руйнування інфраструктури та природних ресурсів. Внаслідок бомбардувань, обстрілу та інших дій можуть бути пошкоджені або повністю знищені будинки, дороги, мости, заводи, електростанції та інші споруди. Це може призвести до порушення нормального функціонування суспільства та економіки, а також погіршення якості життя населення. Крім того, в ході війни зазвичай зменшується доступ до природних ресурсів, таких як питна вода, ліси та нафта, які використовуються для задоволення потреб армій та цивільного населення. Це може призвести до забруднення питної води, виснаження лісів та інших ресурсів, а також до пошкодження природних заповідників та парків.

За підрахунками Української природоохоронної групи, близько 44% площі установ природно-заповідного фонду (природні та біосферні заповідники, національні природні парки) перебувають в зоні бойових дій, або під тимчасовою окупацією російських військ. Масоване застосування артилерії та авіації в місцях боїв призводить до виникнення численних пожеж і пошкодження рослинного покриву. Однак, тваринний світ перебуває під ще більшою загрозою, адже окрім пожеж, їм також загрожує браконьєрство з боку військових, шум військового транспорту та боїв. Дрібні тварини (комахи та ін.), що в цей період перебувають у анабіозі – згорають разом із рослинністю. Особливо небезпечними зараз виглядають з огляду на початок весняної міграції птахів. Багато видів прилетять гніздувати на Азово-Чорноморське узбережжя, де тривають бойові дії і не зможуть дати нове покоління через фактор турбування. Ще частина птахів повертатиметься в місця гніздування на Поліссі, де тривають не лише бойові дії а й неймовірної сили лісові пожежі.

Науковці зі США та України ідентифікують шість ключових факторів, що сприяють утворенню відходів та забрудненню довкілля в умовах війни. До них належать бомбардування, переміщення військової техніки, руйнування цивільних і промислових будівель, лісові пожежі, а також пошкодження сховищ палива та промислових об'єктів. Усі ці прояви війни відбуваються більшою чи меншою мірою по всій території України, однак найбільше постраждали Київська, Донецька, Харківська та Луганська області.

Згідно з даними Державної екологічної інспекції України, станом на квітень 2024 року збитки, завдані російською агресією навколишньому середовищу, досягли майже 2,5 трильйона гривень. Війна завдає значних руйнувань біосфері, поєднуючи масштабні екологічні втрати з погіршенням умов життя для місцевого населення. Під час військових дій знищуються природні ресурси, пошкоджуються екосистеми, забруднюються землі, водні джерела та повітря.

На території східних областей України зафіксовано руйнування дамб, лісів, природно-заповідних зон, що призводить до утворення забруднених територій, які тривалий час залишатимуться непридатними для проживання. Окремою проблемою екології є поява значної частини відходів. За даними Міністерства розвитку громад та територій, на звільнених територіях Київської, Чернігівської та Сумської областей внаслідок руйнувань, спричинених російською агресією, утворилося понад 15 мільярдів тонн відходів. Крім того, у спеціально визначених зонах зберігаються понад 200 тисяч знищених легкових і вантажних автомобілів. Тривале перебування цих відходів в Україні спричиняє забруднення ґрунтів, води й повітря, а також додаткові викиди парникових газів, що негативно впливають на кліматичні процеси.

Нині наша країна перебуває у стані війни, це доволі скрутне становище для усіх звичних для нас речей, у тому числі екологічної безпеки. Ми усі зараз активно слідкуємо за неприємними новинами, і розуміємо, що війна має величезні наслідки для нашої країни. У перші дні повномасштабного наступу російські бойовики змогли захопити Чорнобильську АЕС (ЧАЕС). Але до того, як ЧАЕС перейшла під контроль агресора, за неї велися бої, російські солдати нещадно стріляли на території небезпечної зони, і могли з легкістю пошкодити реактори, що призвело би до глобальної катастрофи. Окрім ЧАЕС, у ніч на 4 березня ядерну безпеку на Запорізькій АЕС було порушено, реактори опинилися в небезпеці через обстріл російських військових і пожежу. Спочатку пожежників, навіть, не допускали для ліквідації пожежі, проте, згодом, вони, все ж таки, це зробили та пожежу було ліквідовано. Російські військові погрожували підірвати блоки АЕС, і це могло би мати величезні наслідки для багатьох країн, у тому числі і для країни-агресора. Російська Федерація не бажає замислитись над тим, яку екологічну катастрофу вони можуть спричинити своїми божевільними діями. Поки на нашій території ведуться воєнні дії, ми знаходимось у потенційній екологічній небезпеці, адже ворог не хеще божевільними діями.

Атомна електростанція розташована на березі Каховського водосховища, що використовувалось для системи охолодження. Кваліфікований український персонал станції піддався викраденням, вбивствам та нелюдському поводженню, що збільшило ризик ядерних інцидентів і аварій. На станції були присутні співробітники МАГАТЕ, проте переговори про демілітаризацію території не досягли успіху.

Безпрецедентна присутність військових на діючих та призупинених об'єктах атомної енергетики привернула увагу до певних прямих і опосередкованих загроз, які збройні конфлікти можуть створити для ядерної та радіаційної безпеки. Зі свого боку це створило значні виклики для міжнародної архітектури ядерної безпеки та правових засад, покликаних запобігти використанню таких об'єктів під час бойових дій. Також було уражено багато інших ядерних установок та майданчиків з радіоактивними матеріалами. Серед них дослідницькі реактори, ядерні сховища тимчасового та тривалого зберігання, діючі та закриті об'єкти з виробництва урану, а також промислові об'єкти, на яких виробляють або переробляють радіоактивні матеріали природного походження. Про багато потенційно небезпечних радіоактивних джерел інформація на сьогоднішній час відсутня. Пошкодження або руйнування внаслідок військових атак, перебої електропостачання та проблеми в роботі таких об'єктів можуть призвести до ризиків радіоактивного забруднення, яке потенційно може охопити значну

територію України та навіть сусідні країни. Найбільше занепокоєння викликають порушення роботи систем безпеки, а також перепони для контролю та усунення старого радіологічного забруднення. Було докладено зусиль для ремонту та відновлення мережі радіаційного моніторингу України після її пошкодження та виведення з ладу.

Забруднення та екологічні проблеми не обмежуються виключно промисловими комплексами та основними джерелами забруднення, а отже поширюються й на міське середовище. Великі обсяги сміття створили неабиякий тиск на спроможності поводження з твердими відходами в Україні. Нерозірвані боєприпаси та небезпечні матеріали, як-от азбест, змішуються з будівельним сміттям, ускладнюючи поводження з відходами. Війна стала причиною локальних випадків сильного забруднення повітря, попри покращення якості повітря в містах і країні внаслідок сповільнення економічної діяльності. Від пожеж постраждали різні типи будівель та різні галузі, а вплив забруднювачів у повітрі на людей був широко поширеним. Пожежі в сільській місцевості також призвели до погіршення якості повітря в містах. Слід враховувати й викиди в повітря з хімічних підприємств та пил від сміття, яке утворилось внаслідок конфлікту. Забруднювачі з диму та хімічні випари осіли на рослинах, у ґрунті й воді.

З початку війни і до кінця лютого 2023 року ландшафтні пожежі охопили площу, еквівалентну приблизно мільйону футбольних полів. Дві третини цих пожеж сталися поблизу змінних ліній фронту, ймовірно, внаслідок обстрілів та інших бойових дій. Більшість з них сталися на сільськогосподарських землях, але 12% припало на природоохоронні території Смарагдової мережі (Смарагдова мережа (Emerald Network) – це загальноєвропейська система природоохоронних територій, створена для збереження рідкісних видів флори, фауни та оселищ за Бернською конвенцією. Україна активно розвиває цю мережу з 2009 року, включивши вже 377 об'єктів, що є важливим кроком до євроінтеграції та майбутнього створення мережі Natura 2000.) (Станом на 2017 рік мережа Natura 2000 включає 27312 ділянок. Вони охоплюють 787 606 км<sup>2</sup> суходолу (близько 18% території ЄС) та 360 350 км<sup>2</sup> моря. Мережа охоплює дев'ять біогеографічних регіонів: Альпійський, Атлантичний, Чорноморський, Бореальний, Континентальний, Макаронезійський, Середземноморський, Паннонський та Степовий.).

Ландшафтні пожежі є причиною гибелі дикої фауни та рослинності, забруднення водойм, порушення екосистеми, збільшення ерозії ґрунту. Процес відновлення зазвичай повільний. Через війну зросла кількість пожеж і знизилась здатність пожежників їх гасити. Як наслідок також зросли ймовірні ризики виникнення пожеж, що перешкоджає управлінню земельними та лісовими ресурсами, а також знизились спроможності пожежогасіння, адже зростає кількість нерозірваних боєприпасів – головного джерела пожеж.

Широкомасштабна та серйозна шкода, завдана ґрунтам, посівам, системам зрошення, будівлям та устаткуванню вздовж ліній фронту, мала вплив як на тих, хто заробляє на життя сільським господарством, так і на міжнародну продовольчу безпеку. Пошкодження сховищ добрив, пестицидів та інших агрохімікатів призвело до прямих викидів речовин-забруднювачів у навколишнє середовище.

Було пошкоджено та знеструмлено об'єкти тваринництва, що призвело до масової загибелі тварин, а це зі свого боку загрожує мікробіологічним забрудненням. Наявні в Україні проблеми з ерозією та деградацією ґрунту посилилися через пошкодження від обстрілів, пересування важкої техніки та спорудження земляних укріплень. Очікується, що рівень забруднення від військових транспортних засобів, сміття та залишків зброї вздовж ліній фронту буде високим. Бойові дії заподіяли шкоди важливим на регіональному та національному рівнях ареалам та охоронним територіям, відомо про широкий спектр прямих та опосередкованих збитків. Вибуховою зброєю було пошкоджено дерева та рослинність, а воронки від снарядів збільшили вразливість ґрунтів до ерозії та порушили крихкі ареали.

Лісиста місцевість і чагарники використовувались як укриття, пожежі, спричинені використанням боєприпасів на вогневих точках важкого озброєння, охоплювали лісисту місцевість. Паркові будівлі та інфраструктуру було знищено, а обладнання розграбовано.

Забруднення мінами та нерозірваними боєприпасами є широко поширеним і створює перепони для оцінювання шкоди, завданої ареалам. Війна значною мірою вплинула на наявні природоохоронні програми та дослідження. Війна ударила по лісах та лісовому господарству. Бойові дії та пожежі спричинили прямі фізичні збитки, призвели до забруднення мінами та нерозірваними боєприпасами, нищення майна та лісогосподарського обладнання. Очікується, що навіть за найкращих сценаріїв знадобиться принаймні 60-80 років для приведення українського лісового госпо - дарства у довоєнний стан

Окрім цього існує загроза хімічної, біологічної, ядерної катастроф, унаслідок використання зброї масового знищення для мирного населення України. Це принесе загрозу всьому людству, а не тільки нашій державі. Саме в цьому стоїть постановка проблеми: зупинити екологічну небезпеку в умовах бойових дій.

Забруднення ґрунтів паливно-мастильними матеріалами та іншими нафтопродуктами відбувається в наслідок руху та пошкоджень сухопутної військової техніки. У ґрунтах, просочених паливно-мастильними матеріалами, знижується водопроникність, витісняється кисень, порушуються біохімічні та мікробіологічні процеси. Внаслідок цього погіршується водний, повітряний режими, порушується кореневе живлення рослин, гальмується їх ріст і розвиток, що спричиняє загибель живих організмів. Розклад нафти і нафтопродуктів у природних умовах відбувається протягом багатьох років. Продукти їх первинного розкладу є набагато сильнішими екотоксикантами від нафтопродуктів.

На відміну від нафти легкі вуглеводні мають інші властивості вони більш схильні до міграції і відповідно забруднення підземного простору і особливо питних водоносних горизонтів. Відомо, що стічні води підприємств нафтохімії зберігають токсичність навіть після шести місяців відстоювання, а в місцях розливів нафти і нафтопродуктів на ґрунт трав'яний покрив не з'являється протягом багатьох років. Вуглеводні, потрапляючи в одну з природних сфер (повітряне, водне, ґрунтового), залучаються до міграції речовин, як правило, з часом поширюються в кожній з них. На поверхні землі і води окислення і біорозкладання невеликої кількості нафтохімічного забруднення можуть відбуватися природним шляхом, а в геологічному середовищі забруднення може зберігатися протягом багатьох десятиліть, поширюючись разом з ґрунтових водами на великих територіях, що ще однією із прихованих загроз.

Екосистеми можуть переносити різні види забруднення, включаючи нафтохімічне, за умови, що їх концентрація не перевищує допустимих меж. Проте, забруднюючі речовини поступово накопичуються, тому існує ймовірність того, що несприятливі наслідки буде виявлено значно пізніше, що призведе до запізненого вжиття заходів для боротьби із забрудненням.

Шкідливий вплив може також залежати від окремих компонентів нафтопродуктів. У випадку нафтохімічного забруднення остаточний вплив на навколишнє середовище буде сильно залежати від шляхів міграції забруднювача, від джерела забруднення, складу нафтопродукту, що забруднює навколишнє середовище, а також умов, що впливають на фізичні, хімічні та біологічні процеси вивітрювання в навколишньому середовищі.

1. Запорізька АЕС: захоплення окупантами, ядерний тероризм. (2022). URL : <https://mvs.gov.ua/news/zaporizka-aes-zaxoplennia-okupantami-iadernii-terorizm>

2. Духневич А.В., & Карпінська Н.В. (2025). Екологічні наслідки війни: оцінка впливу відходів на навколишнє середовище. *Електронне наукове видання «Аналітично-порівняльне правознавство»*. Випуск № 01,. С. 347-352.

3. Артамонов В. А., & Коломієць Г. В. (2017). Оселища натура-2000 в Національному природному парку «Бузький гард». Матеріали науково-практичного семінару. / Серія: «Conservation Biology in Ukraine». – Вип. 1. – Київ, 2017. –с.15-17.

## **ПІДХОДИ ДО МІНІМІЗАЦІЇ ВТОРИННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ ПІД ЧАС ЗНЕШКОДЖЕННЯ БПЛА В УМОВАХ ВІЙНИ**

Сучасна війна спричиняє не лише пряме руйнування інфраструктури, а й довготривале техногенне навантаження на довкілля. Одним із недостатньо висвітлених аспектів цієї проблеми є вторинне забруднення, що виникає після знешкодження безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Йдеться про розсіювання уламків корпусу, електронних компонентів, акумуляторів, полімерів, металів, а також продуктів горіння та вибухового руйнування. Дослідження наслідків бойових дій показують, що уражені території зазнають фізичного порушення ґрунтів і хімічного забруднення важкими металами, токсичним пилом, залишками боєприпасів і техногенних матеріалів, причому частина таких наслідків зберігається роками [1, 2].

Актуальність проблеми посилюється тим, що сучасні БПЛА, особливо малі та середні платформи, здебільшого використовують літєві батареї, електронні модулі керування, полімерні деталі, а також конструкції на основі вуглецевих і скловолоконних композитів [3]. Літєві батареї є ефективним джерелом живлення для безпілотних систем, однак після механічного пошкодження, займання або неконтрольованого потрапляння у довкілля вони можуть ставати джерелом забруднення ґрунту, води й повітря; окрему небезпеку становлять пожежі та вибухи пошкоджених елементів [4]. Не менш важливою є проблема композитних матеріалів: вони забезпечують малу масу й міцність конструкції, але водночас залишаються складними для перероблення та часто формують важкоутилізований дрібнофрагментований відхід [5, 6].

Метою даної праці є узагальнення підходів до мінімізації вторинного забруднення довкілля під час знешкодження БПЛА в умовах війни. На основі проаналізованих джерел доцільно виокремити перший блок заходів, пов'язаний зі стадією проєктування та постачання. Його сутність полягає у зниженні потенційної токсичності конструкції ще до початку експлуатації: використанні більш придатних до перероблення матеріалів, обмеженні надлишкового застосування важкоперероблюваних композитів, модульній побудові батарейних та електронних вузлів, а також маркуванні компонентів для подальшого сортування. У літературі наголошується на потребі врахування екологічних критеріїв і принципів циркулярної економіки під час розроблення БПЛА; окремо відзначається перспективність біобазованих композитів, хоча їх використання у безпілотних системах поки що залишається недостатньо опрацьованим [7]. Це дає підстави розглядати екодизайн БПЛА як один із ключових інструментів для зменшення майбутнього воєнного забруднення.

Другий блок заходів стосується безпосередньо способу знешкодження. З екологічного погляду пріоритет слід надавати таким підходам, які мінімізують фрагментацію конструкції, термічне руйнування акумуляторів і широке розсіювання уламків. Тобто там, де це допускає оперативна обстановка, доцільно орієнтуватися на примусову посадку, перехоплення, блокування функціонування або інші способи нейтралізації з нижчим рівнем матеріального розпилення, ніж при руйнівному ураженні. Якщо ж фізичне знищення є неминучим, екологічний компонент має включати обов'язкову процедуру швидкої локалізації місця падіння, збору уламків, вилучення пошкоджених батарей та електроніки, а також окремого поводження з ними як з потенційно небезпечними відходами. Такий висновок логічно випливає з відомих ризиків, пов'язаних із токсичним пилом, уламками боєприпасів, пошкодженими літєвими батареями та складністю перероблення безпілотних платформ [1, 4, 5].

Третій блок пов'язаний з інформаційною підтримкою екологічного реагування після інциденту. Саме інформаційні технології дають змогу перетворити знешкодження БПЛА з суто тактичної дії на керований процес із контролем екологічних наслідків. До таких рішень належать: геоприв'язана фіксація місць падіння БПЛА; GIS-реєстри інцидентів; мобільні

інструменти для фотофіксації та класифікації уламків; дистанційне зондування Землі для виявлення зон порушення рослинного покриву, слідів горіння та потенційно забруднених ділянок; системи підтримки прийняття рішень, які враховують близькість водних об'єктів, сільськогосподарських угідь, населених пунктів і природоохоронних територій. Дослідники підкреслюють, що дистанційний моніторинг є одним із найважливіших інструментів оцінювання екологічних наслідків війни там, де польові роботи обмежені міркуваннями безпеки або доступу [8, 9].

Отже, мінімізація вторинного забруднення довкілля під час знешкодження БПЛА потребує комплексного підходу, що поєднує екологічно орієнтоване проєктування безпілотних систем, вибір способів нейтралізації з нижчим рівнем матеріального розсіювання та цифровий моніторинг наслідків інцидентів. Запровадження таких підходів дасть змогу зменшити локальне забруднення ґрунтів і вод, спростити подальшу утилізацію уламків та підвищити екологічну безпеку територій, що зазнають впливу бойових дій.

1. Hryhorczuk, D., Levy, B. S., Prodanchuk, M., Kravchuk, O., Bubalo, N., Hryhorczuk, A., & Erickson, T. B. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 19, 1. <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>
2. Solokha, M., Pereira, P., Symochko, L., Vynokurova, N., Demyanyuk, O., Sementsova, K., Inacio, M., & Barcelo, D. (2023). Russian-Ukrainian war impacts on the environment: Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of the Total Environment*, 902, 166122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122>
3. Xiao, C., Wang, B., Zhao, D., & Wang, C. (2023). Comprehensive investigation on lithium batteries for electric and hybrid-electric unmanned aerial vehicle applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 38, 101677. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101677>
4. Mrozik, W., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., & Christensen, P. (2021). Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 14(12), 6099–6121. <https://doi.org/10.1039/D1EE00691F>
5. Kordos, A., Kmiotek, M., Żyłka, W., & Muszyński, T. (2024). The problem of recycling of unmanned aerial vehicles. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(7), 277–288. <https://doi.org/10.12913/22998624/193478>
6. Meng, F., Cui, Y., Pickering, S., & McKechnie, J. (2020). From aviation to aviation: Environmental and financial viability of closed-loop recycling of carbon fibre composite. *Composites Part B: Engineering*, 200, 108362. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108362>
7. Mitchell, S., Steinbach, J., Flanagan, T., Ghabezi, P., Harrison, N., O'Reilly, S., Killian, S., & Finnegan, W. (2023). Evaluating the sustainability of lightweight drones for delivery: Towards a suitable methodology for assessment. *Functional Composite Materials*, 4(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00040-4>
8. Kaplan, G., Rashid, T., Gasparovic, M., Pietrelli, A., & Ferrara, V. (2022). Monitoring war-generated environmental security using remote sensing: A review. *Land Degradation & Development*, 33(10), 1513–1526. <https://doi.org/10.1002/ldr.4249>
9. Zwijnenburg, W., & Ballinger, O. (2023). Leveraging emerging technologies to enable environmental monitoring and accountability in conflict zones. *International Review of the Red Cross*, 105(924), 1497–1521. <https://doi.org/10.1017/S1816383123000383>

## КІБЕРБЕЗПЕКА ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ЯК СКЛАДОВА БЕЗПЕКИ ДОВКІЛЛЯ В УМОВАХ ВІЙНИ

Трансформація енергетичної системи України в умовах повномасштабної збройної агресії відбувається на перетині двох взаємопов'язаних процесів: прискореного переходу до відновлюваної генерації та критичного загострення загроз для критичної інфраструктури. Метою цього дослідження є аналіз, як децентралізація та цифровізація об'єктів відновлюваної енергетики формують нові кіберризики, що мають безпосередній вплив на безпеку довкілля, а також обґрунтування необхідності інтеграції кіберзахисту в екологічну та безпекову політику воєнного і повоєнного часу. Актуальність проблематики визначається тим, що ані законодавча база, ані галузеві стандарти наразі не розглядають кібербезпеку об'єктів відновлюваної генерації як складову екологічної безпеки – попри те, що реальні інциденти переконливо свідчать про нероздільність цих двох вимірів.

Закарпатська область – регіон, що у 2024–2026 роках перетворився на один із головних майданчиків нової вітрогенерації в Україні. Географічні переваги Карпат у поєднанні з відносною віддаленістю від активних бойових дій зумовили концентрацію тут значних інфраструктурних проєктів: зокрема, дві вітрові електростанції в регіоні вже виробили понад 5 млн кВт·год електроенергії [1]. Паралельно компанія Friendly Wind Technologies налагодила в Закарпатті виробництво вітротурбін потужністю 4,8–5,5 МВт, перетворюючи регіон не лише на майданчик генерації, а й на виробничий хаб технологій відновлюваної енергетики [2]. У 2026 році схвалено проєкт вітропарку на Полонині Руна із запланованою потужністю близько 156 МВт, однак його реалізація вже супроводжується документально зафіксованими екологічними порушеннями – пошкодженням ґрунтового покриву гірських хребтів [3; 4]. Саме ця динаміка – швидке нарощування цифрової енергетичної інфраструктури на чутливих природних територіях – і ставить ключове дослідницьке питання про характер пов'язаних з нею ризиків.

Цифровізація кожного нового об'єкта генерації означає не лише підвищення ефективності управління, а й кратне збільшення так званої поверхні атаки. Сучасні вітроелектростанції функціонують через SCADA-системи, інвертори, програмовані логічні контролери та розгалужені сенсорні мережі, підключені до корпоративних і публічних каналів зв'язку. Аналіз цього механізму є необхідним для вироблення підходів до захисту як самих об'єктів, так і природного середовища, в якому вони розташовані. Наукові дослідження, зокрема аналіз кореляційних структур вітропарків, підтверджують, що взаємозалежність між турбінами проявляється у вигляді домінуючої колективної поведінки – компрометація одного вузла здатна дестабілізувати суміжні об'єкти непропорційно до масштабу початкового втручання [5].

Реальність загрози підтверджується унікальним досвідом України. У грудні 2015 року атака групи Sandworm із застосуванням BlackEnergy призвела до знеструмлення близько 230 тисяч споживачів – перший у світі підтверджений випадок кібератаки з безпосередніми фізичними наслідками для енергомережі. У грудні 2016 року ПЗ Industroyer вперше реалізувало повністю автоматизоване відключення підстанцій через пряму взаємодію з промисловими протоколами IEC 101 та IEC 104, без участі оператора. У жовтні 2022 року Sandworm здійснив комплексну атаку на об'єкт високовольтної інфраструктури, поєднавши OT-вектор через SCADA із застосуванням wiper-ПЗ CADDYWIPER для знищення даних в IT-середовищі – атаку виявлено і задокументовано Mandiant [6; 7]. Ця хронологія ілюструє послідовну еволюцію загроз: від ручного втручання до повністю автоматизованих кібер-фізичних операцій із наростаючою деструктивністю.

Особливу небезпеку в контексті безпеки довкілля становлять stealth-атаки, що не викликають миттєвого блекауту, але поступово руйнують керованість системи. Підміна телеметричних даних позбавляє операторів можливості адекватно оцінювати стан мережі, а

маніпуляція параметрами генерації здатна спровокувати аварії з прямими екологічними наслідками: витіки технологічних рідин, займання обладнання, механічні руйнування безпосередньо на чутливих гірських екосистемах. Обґрунтування цього зв'язку – між кібербезпекою та екологічною безпекою – є принципово важливим для цього дослідження, оскільки він наразі залишається поза увагою більшості регуляторних документів. Полонини, де реалізуються проекти кшталту Полонини Руна, є екосистемами з обмеженою здатністю до відновлення, і питання відповідальності за екологічну шкоду внаслідок кібервтручання залишається законодавчо неврегульованим [3].

Проведене дослідження показало, що стрімкий розвиток відновлюваної енергетики в Закарпатській області формує не лише нові генеруючі потужності, а й нові вразливості, що перебувають на перетині кіберпростору та фізичного довкілля. Подальше нарощування розподіленої генерації без паралельного впровадження механізмів кіберзахисту створює передумови для системних збоїв. Отримані результати свідчать про необхідність врахування всіх аспектів – технічних, екологічних і правових, зокрема й кібербезпеки – вже на етапі проєктування таких систем, а не пале нісля їх введення в експлуатацію. В такому разі, енергетичний перехід в умовах війни має супроводжуватися не лише швидкістю впровадження рішень, а й відповідальністю за їхню безпечність, зокрема у кібер- та екологічному вимірах.

1. Суспільне Мовлення. (2025). Дві вітрові електростанції на Закарпатті виробили понад 5 млн кВт·год енергії. <https://suspilne.media/uzhhorod/926001-dvi-vitrovi-elektrostantsii-na-zakarpatti-virobili-ponad-5-mln-kvt-god-energii/>

2. Ukrainian Wind Energy Association. (2025). Zakarpattia: The new hub of Ukraine's wind turbine manufacture. <https://uwea.com.ua/en/news/entry/zakarpattya-sta-centrom-ukranskogo-virobnictva-vtroturbn/>

3. EcoPolitics. (2025). Wind energy workers have excavated mountain debris in Zakarpattia. <https://ecopolitic.com.ua/en/news/na-zakarpatti-vitroenergetiki-rozkopali-girsku-poloninu-2/>

4. Jungblut, E., Bette, H. M., & Guhr, T. (2023). Spatial structures of wind farms: Correlation analysis of the generated electrical power. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2210.12969>

5. Greenberg, A. (2017, June 20). How an entire nation became Russia's test lab for cyberwar. Wired. <https://www.wired.com/story/russian-hackers-attack-ukraine/>

6. Mandiant. (2023). Sandworm disrupts power in Ukraine using a novel attack against operational technology. Google Cloud Blog. <https://cloud.google.com/blog/topics/threat-intelligence/sandworm-disrupts-power-ukraine-operational-technology/>

**Огразанський Владислав**  
**Мукачівський державний університет**

## **РЕГУЛЯТОРНА ПОЛІТИКА ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТА ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ**

Сучасний етап розвитку територіальних громад України характеризується поєднанням кількох взаємопов'язаних викликів: воєнної нестабільності, руйнування інфраструктури, бюджетних обмежень, демографічних втрат, релокації бізнесу й населення, зростання потреб у соціальних послугах, а також необхідності адаптації місцевого управління до стандартів Європейського Союзу. У таких умовах регуляторна політика територіальних громад перестає бути лише процедурою підготовки та ухвалення регуляторних актів. Вона набуває значення інструмента локальної стійкості, економічної активізації, зменшення адміністративних бар'єрів і формування передумов післявоєнного відновлення.

В умовах невизначеності саме територіальна громада стає первинним рівнем, на якому регуляторне рішення безпосередньо впливає на економічну поведінку підприємців, інвесторів,

домогосподарств і громадських інституцій. Надмірно складні або непрозорі місцеві регуляторні процедури посилюють транзакційні витрати бізнесу, знижують довіру до органів місцевого самоврядування та обмежують можливості залучення ресурсів для відновлення. Натомість якісна регуляторна політика здатна забезпечити передбачуваність правил, спростити доступ до адміністративних послуг, активізувати підприємницьку ініціативу, підтримати релокований бізнес і створити сприятливе середовище для інвестицій у відновлення.

Особливої актуальності набуває переосмислення регуляторної політики громад у контексті післявоєнного відновлення. За оцінкою RDNA5, оприлюдненою Урядом України, Світовим банком, Європейською комісією та ООН, станом на 31 грудня 2025 року загальна вартість відновлення і реконструкції України на наступне десятиліття оцінюється майже у 588 млрд дол. США, а прямі пошкодження перевищують 195 млрд дол. США. Найбільш ураженими залишаються житловий, транспортний та енергетичний сектори, а потреби концентруються насамперед у прифронтових регіонах і великих міських агломераціях. Це означає, що регуляторна політика громад має бути інтегрована не лише у поточне місцеве управління, а й у ширшу систему відновлення територій [1].

До ключових проблем регуляторної політики територіальних громад в умовах невизначеності доцільно віднести такі. По-перше, значна частина громад має обмежену інституційну спроможність щодо підготовки якісного аналізу регуляторного впливу. Часто регуляторні рішення ухвалюються без достатньої оцінки їхніх економічних, соціальних і бюджетних наслідків. По-друге, слабкою залишається практика системного відстеження результативності регуляторних актів, що унеможливує своєчасне виявлення неефективних або надмірно обтяжливих норм. По-третє, громадські консультації нерідко мають формальний характер і не забезпечують реального включення бізнесу, громадських організацій, внутрішньо переміщених осіб, ветеранських спільнот, молоді та інших груп у процес вироблення місцевих правил. По-четверте, регуляторна політика громад не завжди пов'язана зі стратегіями розвитку, програмами відновлення, просторовим плануванням і бюджетним процесом.

В умовах післявоєнного відновлення регуляторна політика має виконувати не лише обмежувальну або дозвоільну, а й стимулюючу функцію. Це означає, що місцеві регуляторні акти повинні оцінюватися з позиції їхнього впливу на відновлення підприємницької активності, зайнятості, інвестицій, доступності послуг, розвитку людського капіталу та просторової згуртованості громади. Регуляторне рішення має відповідати не лише критеріям законності, а й критеріям доцільності, пропорційності, антикризової гнучкості та відновлювального ефекту [2].

Регуляторна політика територіальних громад у сучасних умовах повинна розглядатися як один із ключових інструментів забезпечення стійкості та відновлення локальних соціально-економічних систем. Її ефективність визначається не кількістю ухвалених актів, а якістю регуляторного середовища, рівнем довіри до місцевого самоврядування, здатністю громади мінімізувати адміністративні бар'єри та створювати умови для економічної активності. Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення методики оцінювання регуляторної спроможності територіальних громад з урахуванням критеріїв прозорості, результативності, адаптивності, цифровізації та відновлювального впливу.

1. Government of Ukraine. (2024). *Ukraine Facility Plan 2024–2027*. Ministry of Economy of Ukraine. URL: <https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/en/home/>

2. Verkhovna Rada of Ukraine. (2003). *Law of Ukraine “On the principles of state regulatory policy in the field of economic activity” No. 1160-IV*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1160-15>

3. World Bank, Government of Ukraine, European Commission, & United Nations. (2026). *Updated Ukraine recovery and reconstruction needs assessment released*. World Bank. URL: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2026/02/23/updated-ukraine-recovery-and-reconstruction-needs-assessment-released>

## **БІОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ: ФОРМУВАННЯ ТА АПРОБАЦІЯ БАГАТОРІВНЕВОГО АЛГОРИТМУ (НА ПРИКЛАДІ САВИНСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ)**

Повномасштабна військова агресія проти України спричинила формування нових типів екологічних загроз, пов'язаних із багатокомпонентним хімічним забрудненням, деградацією екосистем та порушенням біогеохімічних циклів. Особливістю таких впливів є їх комплексний, кумулятивний і віддалений характер, що обумовлює необхідність застосування інтегральних біологічних підходів до їх оцінки.

Існуючі інструментальні методи екологічного контролю дозволяють фіксувати перевищення концентрацій окремих забруднювачів, однак не враховують їх сумарний біологічний ефект. Водночас саме генотоксичні, цитотоксичні та мутагенні впливи визначають довгострокові ризики для біоти та здоров'я населення.

У межах дослідження було сформовано багаторівневий алгоритм біологічної оцінки впливу воєнних дій на довкілля, апробація якого відбувалася у два етапи: пілотний (НПП «Кам'янська Січ») та розширений (Савинська територіальна громада Харківської області).

На пілотному етапі було обґрунтовано доцільність використання біоіндикаційних і біотестових методів, зокрема аналізу стерильності пилку та *Allium* сера-тесту для оцінки цитогенетичної активності ґрунтів. Отримані результати підтвердили наявність вираженого цитотоксичного та кластогенного впливу середовища.

Подальший розвиток підходу було реалізовано на прикладі Савинської територіальної громади, де алгоритм було суттєво розширено та доповнено новими рівнями біологічної індикації.

Зокрема, у межах дослідження було застосовано:

- біоіндикацію атмосферного повітря за показниками стерильності пилку рослин-індикаторів;
- оцінку цитотоксичності ґрунтів із використанням *Allium* сера-тесту (мітотичний індекс, хромосомні аберації, мікроядерний аналіз);
- аналіз букального епітелію населення як індикатора генетичного ризику;
- інтеграцію отриманих результатів у систему узагальнених показників токсико-мутагенного навантаження.

Результати досліджень засвідчили значну просторову неоднорідність екологічного стану території. Було встановлено градієнт токсико-мутагенного пресингу – від помірного до критичного рівня, що проявляється у:

- достовірному зниженні мітотичної активності клітин тест-об'єктів;
- підвищенні частоти хромосомних аберацій;
- зростанні мікроядерного індексу;
- підвищенні стерильності пилку рослин-індикаторів.

Особливо важливим результатом стало проведення зонування території громади за рівнем токсико-мутагенного навантаження. Виділено зони:

- умовно безпечні;
- з підвищеним рівнем впливу;
- критичного екологічного стану.

Таке зонування має принципове значення для подальших управлінських рішень, оскільки дозволяє перейти від узагальнених оцінок до просторово диференційованого управління територіями.

Зокрема, його практичне значення полягає у:

- визначенні територій, де необхідні обмеження господарської діяльності;
- пріоритезації заходів рекультивації та екологічного відновлення;

- ідентифікації зон потенційного ризику для здоров'я населення;
- плануванні системи моніторингу з урахуванням «гарячих точок»;
- обґрунтуванні необхідності додаткових медико-екологічних досліджень.

Важливо, що використання біологічних показників дозволяє врахувати не лише поточний рівень забруднення, але й його віддалені наслідки, пов'язані з накопиченням генетичних ушкоджень та порушенням функціонування біологічних систем.

Таким чином, запропонований підхід дозволяє сформувати цілісну систему еколого-санітарного моніторингу територій, що зазнали впливу бойових дій, та створює наукове підґрунтя для:

- мінімізації екологічних і медичних ризиків;
- прийняття ефективних управлінських рішень;
- документування наслідків воєнного впливу на довкілля;
- формування доказової бази для міжнародних процесів щодо відшкодування екологічних збитків.

1. Наказ МОЗ України № 116 від 13.03.2007 р. (2007). Про затвердження методичних рекомендацій «Обстеження та районування території за ступенем впливу антропогенних чинників на стан об'єктів довкілля з використанням цитогенетичних методів». Офіційний вісник України, 4, 186–209.

2. Миленька, М. М. (2008). Цитогенетична оцінка стану ґрунтів Бурштинської урбоєкосистеми. Вісник Львівського університету. Серія біологічна, 49, 128–137.

3. Fulco, C. E., Liverman, C. T., & Sox, H. C. (Eds.). (2000). *Gulf War and health: Volume 1. Depleted uranium, pyridostigmine bromide, sarin, and vaccines*. Washington, DC: National Academy Press.

4. Лобойченко, В. М., & Пліско, А. В. (2017). Оцінка екологічних наслідків від вибухів патронів та гранат на складах боєприпасів. Збірник наукових робіт курсантів, 15, 112–120.

5. Сплодитель, А. О. (2023). Методичні рекомендації з відбору проб ґрунту в зонах бойових дій. Київ–Чернівці: Друк Арт.

6. Бешлей, З. М., Бешлей, С. В., Баранов, В. І., & Терек, О. І. (2014). Використання рослинних тест-систем для оцінки токсичності техногенно забруднених субстратів. Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія: Біологія, 1, 97–102.

7. Григорчук, І. Д. (2016). Використання рослинних біоіндикаторів для оцінки токсичності ґрунтів на території м. Кам'янця-Подільського. Біологічні системи, 8(2), 212–218.

8. Джура, Н. М., Романюк, О. І., Гонсьор, Я., Цвілинюк, О. М., & Терек, О. І. (2006). Використання рослин для рекультивації ґрунтів, забруднених нафтою і нафтопродуктами. Екологія та ноосферологія, 17(1–2), 55–60.

9. ДСТУ ISO 11269-1:2004. (2005). Якість ґрунту. Визначання дії забрудників на флору ґрунту. Частина 1: Метод визначення гальмівної дії на ріст коренів. Київ: Держспоживстандарт України.

10. ДСТУ ISO 11269-2:2002. (2004). Якість ґрунту. Визначання дії забрудників на флору ґрунту. Частина 2: Вплив хімічних речовин на проростання та ріст вищих рослин. Київ: Держспоживстандарт України.

11. Тригуб, В. І., & Домусчи, С. В. (2020). Біотестування як метод дослідження токсичності ґрунтів. Вісник Одеського національного університету. Серія: Географічні та геологічні науки, 25(2), 112–127.

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СИСТЕМІ ФІНАНСОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВ У ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД**

У сучасних умовах повоєнної трансформації економіки України проблема фінансового забезпечення сталого розвитку підприємств набуває особливої актуальності. Масштабні руйнування виробничої інфраструктури, порушення логістичних зв'язків, скорочення інвестиційної активності, зростання енергетичних витрат та нестабільність фінансового середовища суттєво ускладнюють процес відновлення суб'єктів господарювання. Водночас повоєнний період формує необхідність переходу до нової моделі економічного розвитку, заснованої на принципах цифровізації, екологічної безпеки, ресурсоефективності та інтеграції інноваційних технологій у систему управління підприємствами. У цьому контексті інформаційні технології стають важливим інструментом забезпечення фінансової стійкості підприємств, підвищення ефективності управління ресурсами та формування механізмів сталого економічного розвитку.

Особливого значення набуває впровадження цифрових технологій у систему фінансового менеджменту підприємств. Використання автоматизованих платформ фінансового аналізу, Big Data, хмарних сервісів, ERP-систем та технологій штучного інтелекту дозволяє забезпечити оперативне управління фінансовими потоками, прогнозування ризиків та формування адаптивних фінансових стратегій. У сучасних умовах цифрові інструменти створюють можливість інтеграції фінансових, виробничих та екологічних показників діяльності підприємств, що сприяє підвищенню ефективності управлінських рішень та забезпеченню довгострокової фінансової стабільності бізнесу [1]. Автоматизація фінансових процесів дозволяє оптимізувати витрати, підвищити прозорість використання ресурсів та забезпечити оперативний контроль за результативністю діяльності підприємств.

Водночас фінансове забезпечення сталого розвитку підприємств у повоєнний період тісно пов'язане із впровадженням екологічно орієнтованих інформаційних технологій. У сучасних умовах концепція сталого розвитку передбачає поєднання економічної ефективності, соціальної відповідальності та екологічної безпеки. Використання цифрових систем екологічного моніторингу, технологій енергетичного менеджменту, платформ контролю використання ресурсів та систем автоматизованого управління виробничими процесами дозволяє підприємствам знижувати рівень енергоспоживання, скорочувати викиди забруднюючих речовин та підвищувати ефективність використання природних ресурсів [2]. Це створює передумови для формування екологічно безпечної моделі господарювання та забезпечення відповідності підприємств сучасним міжнародним стандартам ESG-управління.

Особливого значення набуває цифровізація процесів залучення фінансових ресурсів для забезпечення сталого розвитку підприємств. Використання цифрових платформ фінансування, електронних систем банківського обслуговування, інструментів фінансових технологій (FinTech) та електронних інвестиційних сервісів сприяє розширенню доступу підприємств до фінансових ресурсів. У сучасних умовах цифрові технології дозволяють забезпечити ефективну взаємодію підприємств із банківськими установами, інвесторами, міжнародними фінансовими організаціями та державними інституціями [3]. Важливу роль у цьому процесі відіграє розвиток механізмів цифрового кредитування, електронних грантових платформ та інструментів фінансової підтримки інноваційних і екологічних проєктів.

У системі фінансового забезпечення сталого розвитку підприємств важливу роль відіграють інформаційні технології у сфері ризик-менеджменту. Повоєнний період характеризується високим рівнем фінансових, інвестиційних, екологічних та кібернетичних ризиків, що потребує впровадження сучасних цифрових інструментів прогнозування та аналізу ризикових ситуацій. Використання аналітичних платформ, систем моделювання фінансових ризиків, автоматизованих сервісів оцінювання інвестиційної привабливості та технологій

штучного інтелекту дозволяє підприємствам своєчасно реагувати на зміни зовнішнього середовища та формувати ефективні стратегії фінансової стабілізації. Цифровізація ризик-менеджменту забезпечує підвищення адаптивності підприємств до кризових процесів та створює передумови для довгострокового сталого розвитку.

На рівні державної політики важливим завданням є формування комплексної системи підтримки цифрової трансформації підприємств у повоєнний період. Це передбачає розвиток цифрової інфраструктури, удосконалення механізмів державного фінансування інноваційних та екологічних проєктів, стимулювання цифровізації бізнесу та забезпечення інтеграції українських підприємств у міжнародний цифровий економічний простір. Особливого значення набуває формування інституційних механізмів підтримки підприємств, орієнтованих на впровадження енергоефективних технологій, розвиток "зеленої" економіки та цифрових систем екологічного управління.

В умовах сучасних викликів важливим елементом фінансового забезпечення сталого розвитку підприємств є інформаційна безпека та захист цифрової інфраструктури. Зростання рівня кіберзагроз, ризиків втрати даних та порушення функціонування цифрових фінансових систем потребує впровадження сучасних механізмів кіберзахисту, багаторівневої автентифікації та систем резервного збереження інформації. Надійність цифрової інфраструктури є необхідною умовою забезпечення безперервності фінансових процесів та стійкості підприємств до зовнішніх загроз.

Отже, інформаційні технології є важливим інструментом фінансового забезпечення сталого розвитку підприємств у повоєнний період. Їх використання сприяє підвищенню ефективності фінансового менеджменту, оптимізації використання ресурсів, забезпеченню екологічної безпеки та формуванню адаптивної моделі управління підприємствами. Інтеграція цифрових технологій у систему фінансового забезпечення створює передумови для підвищення конкурентоспроможності підприємств, забезпечення їх довгострокової стійкості та реалізації принципів сталого розвитку в умовах повоєнного відновлення економіки України.

1. Коваленко, О.В., & Гончарук, Т.О. (2022). Інноваційні підходи до управління сталим розвитком підприємства в умовах цифрової трансформації. *Економіка та держава*, 11 (185), 45-61.

2. Петренко, М.В., & Литвиненко, Ю.С. (2023). Стратегічний аналіз інноваційної діяльності підприємств в умовах нестабільного ринку. *Бізнес Інформ*, 4 (520), 72-89.

3. Мельник, В.Г., & Савченко, І.П. (2023). Ефективність інноваційних стратегій для забезпечення сталого розвитку підприємств. *Маркетинг і менеджмент інновацій*, 3 (71), 108-123.

**Прокопчук Ірина**  
*Державний торговельно-економічний університет*

## **ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЯК ЕЛЕМЕНТ НАЦІОНАЛЬНОЇ ТА ГЛОБАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ: НОРМАТИВНО-ПРАВОВА ВІДПОВІДЬ НА ВИКЛИКИ ПОВНОМАСШТАБНОЇ ВІЙНИ**

Безпека довілля в умовах повномасштабної війни набуває принципово нового значення, трансформуючись із галузевої категорії екологічного права у системний елемент національної та глобальної безпеки. Збройна агресія проти України продемонструвала, що довілля більше не є лише «супутньою жертвою» військових конфліктів, а виступає об'єктом комплексного руйнівного впливу, який має довгострокові, транскордонні та міжпоколінні наслідки. За оцінками Програми ООН з довілля, збройний конфлікт в Україні вже спричинив масштабні та

потенційно довготривалі наслідки для довкілля, включаючи забруднення екосистем і накопичення небезпечних речовин, що може впливати на здоров'я населення протягом десятиліть (UNEP, 2022). Це обумовлює необхідність перегляду існуючих нормативно-правових підходів та формування нової парадигми екологічної безпеки в умовах збройних конфліктів.

На конституційному рівні в Україні закріплено право кожного на безпечне для життя і здоров'я довкілля (Конституції України, 1996, ст.50). Однак у ситуації війни ця норма набуває декларативного характеру, оскільки її реалізація безпосередньо залежить від ефективності міжнародно-правових гарантій і механізмів захисту. Водночас Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» визначає екологічну безпеку як стан захищеності життєво важливих інтересів людини (Закон України, 25 червня 1991 р. № 1264-XII, ст. 1) та закріплює принцип пріоритетності екологічної безпеки (Закон України, 25 червня 1991 р. № 1264-XII, ст. 3). Проте цей закон не містить спеціалізованих норм щодо функціонування системи екологічної безпеки в умовах воєнного стану, що створює нормативну прогалину в українському законодавстві.

Сучасна війна характеризується високим рівнем техногенного навантаження, що зумовлює масштабні екологічні ризики. Руйнування промислових підприємств, нафтобаз, складів хімічних речовин, гідротехнічних споруд та об'єктів енергетики призводить до комплексного забруднення довкілля. Військові дії спричиняють суттєве забруднення ґрунтів важкими металами, деградацію рослинності та порушення екосистемних зв'язків (Pereira et al., 2023), що є характерним і для територій, охоплених війною в Україні. Аналогічно, інші дослідження підкреслюють негативний вплив війни на водні ресурси, атмосферне повітря та біорізноманіття, що має довгострокові соціально-економічні наслідки (Kumar et al., 2022). Особливої уваги заслуговує проблема каскадних екологічних катастроф. Руйнування Каховської гідроелектростанції стало прикладом техногенної події, яка спричинила масштабне вивільнення токсичних речовин і забруднення водних екосистем, створивши загрозу для всього басейну Дніпра. Подібні інциденти демонструють, що війна генерує не лише локальні, а й регіональні екологічні ризики, що виходять за межі однієї держави.

Міжнародне гуманітарне право містить окремі норми щодо захисту довкілля, однак їх ефективність на сьогодні є обмеженою. Додатковий протокол I до Женевських конвенцій встановлює заборону методів ведення війни, які можуть спричинити «широку, довгострокову і серйозну шкоду» природному середовищу (Protocol I, 1977, art. 35(3), art. 55). Водночас кумулятивний характер цих критеріїв створює надвисокий поріг доказування екологічних злочинів, що суттєво обмежує застосування цієї норми на практиці. Таким чином, більшість екологічних порушень не підпадають під ці критерії, оскільки довгострокові наслідки складно зафіксувати під час активної фази військового конфлікту. Римський статут Міжнародного кримінального суду також містить норму щодо екологічних злочинів, яка передбачає відповідальність за завдання «широкої, довгострокової та серйозної шкоди довкіллю» (Rome Statute, 1998, art. 8(2)(b)(iv)). Однак ця норма практично не застосовується через складність доведення та вузькість формулювання. У цьому контексті дедалі більшої актуальності набуває концепція екоциду як окремого міжнародного злочину. (Duiunova et al., 2024) В сучасних умовах є нагальна потреба включення екоциду до юрисдикції Міжнародного кримінального суду як самостійного складу злочину, що дозволить знизити поріг доказування та забезпечити ефективну відповідальність.

На національному рівні Україна вже зробила кроки у цьому напрямі. Стаття 441 Кримінального кодексу України визначає екоцид як масове знищення флори і фауни або отруєння природного середовища, що може спричинити екологічну катастрофу (Кримінальний кодекс України, 2001). У національній та міжнародній практиці вже сформовано низку методик оцінки екологічної шкоди. Зокрема, в Україні діють профільні методики визначення шкоди ґрунтам (Наказ Міндовкілля №167, 2022), водним ресурсам (Наказ Міндовкілля від 21.07.2022 № 252), атмосферному повітрю (Наказ Міндовкілля від 13.04.2022 № 175), лісовому фонду (Наказ Міндовкілля від 05.10.2022 № 414) та об'єктам природно-заповідного фонду (Наказ

Міндовкілля від 13.10.2022 № 424). На міжнародному рівні застосовуються такі інструменти, як Постконфліктна екологічна оцінка ЮНЕП (UNEP, 2022), загальна методологія ООН, Світового банку та ЄС Оцінка потреб після катастроф (EU, WB, UNDP, 2013), Директива 2004/35/ЄС про екологічну відповідальність (Directive 2004/35/EC, 2004), а також підходи глобальної ініціативи «Економіка екосистем і біорізноманіття» (TEEB, 2010). Водночас відсутність їх уніфікації, міжсекторальної інтеграції та міжнародної верифікації зумовлює ситуацію, за якої практичне застосування ст. 441 КК України ускладнюється не відсутністю методик як таких, а їх фрагментарністю, галузевим характером та непристосованістю до умов збройного конфлікту, що унеможливорює встановлення стандартизованого причинно-наслідкового зв'язку між воєнними діями та екологічною шкодою у міжнародно-правовому вимірі. Важливим аспектом є проблема документування екологічних збитків в Україні. Умови активних бойових дій та високий рівень замінування територій значно ускладнюють проведення традиційних польових досліджень, що безпосередньо знижує якість доказової бази для майбутніх міжнародних судових позовів. У цьому контексті ключову роль відіграють цифрові технології, зокрема супутниковий моніторинг та геоінформаційні системи (ГІС), які дозволяють фіксувати зміни у довкіллі в режимі реального часу. Яскравим прикладом реалізації такого підходу в Україні став запуск платформи «ЕкоЗагроза» (офіційний вебресурс Міндовкілля), що акумулює дані супутникового аналізу та звернення громадян для верифікації фактів екоциду. Так, під час катастрофи на Каховській ГЕС (червень 2023 р.), саме поєднання даних супутників *Sentinel* та *Landsat* із гідродинамічним моделюванням дозволило фахівцям УкрГМІ та НАН України оцінити масштаби затоплення та прогнозувати динаміку осушення Каховського водосховища в умовах неможливості фізичного доступу до зони лиха. Крім того, досвід 2024-2026 рр. продемонстрував ефективність використання БПЛА з мультиспектральними камерами для моніторингу стану лісових масивів та сільськогосподарських угідь у деокупованих районах Харківщини та Херсонщини. Це дозволяє виявляти хімічне забруднення ґрунтів продуктами детонації боєприпасів без ризику для життя дослідників. UNEP підкреслює необхідність поєднання дистанційного моніторингу з подальшими польовими дослідженнями для забезпечення достовірності даних (UNEP, 2022). В українській практиці цей принцип реалізується через стратегію поетапної верифікації: спочатку ГІС-аналіз виявляє «гарячі точки» (наприклад, місця пожеж на нафтобазах або промислових об'єктах), а після розмінування фахівці Державної екологічної інспекції здійснюють виїзд для відбору проб ґрунту та води, що дозволяє юридично закріпити статус екологічної шкоди. Суттєвим викликом є радіаційна безпека. Ведення бойових дій поблизу українських атомних електростанцій створює ризики, які можуть мати глобальні наслідки. Норми міжнародного права, зокрема Конвенція про ядерну безпеку (Convention on Nuclear Safety, 1994), не передбачають ефективних механізмів реагування на військові загрози, що свідчить також про необхідність їх перегляду в контексті сучасних викликів. Не менш важливою є проблема правового статусу природно-заповідного фонду. В умовах російсько-української війни заповідні території зазнають значних руйнувань, що призводить до втрати біорізноманіття. Відсутність спеціального міжнародного статусу для таких територій створює правовий вакуум. Це обґрунтовує необхідність розробки концепції «зеленого гуманітарного права», яка б передбачала особливий режим захисту екологічно вразливих зон особливо в умовах збройних конфліктів. Проблема розмінування українських територій також має екологічний вимір. Використання важкої техніки для очищення територій призводить до деградації ґрунтів і знищення екосистем. Це створює необхідність розробки нормативно-правових актів, які закріплюють екологічно орієнтовані стандарти протимінної діяльності. Окремого аналізу потребує питання кліматичних наслідків війни. Викиди парникових газів, спричинені військовими діями, пожежами та руйнуванням інфраструктури, мають глобальний вплив. Це ставить питання про врахування воєнних емісій у рамках Паризької угоди (United Nations. Paris Agreement, 2015), оскільки документ фактично залишив звітність про військові викиди на розсуд держав, що є серйозною юридичною прогалиною. Концепція «кліматичних боргів» агресора може стати новим напрямом розвитку міжнародного екологічного права. Важливим є також питання доступу до екологічної інформації. Орхуська

конвенція (UNECE, 1998, art. 4) гарантує право громадськості на доступ до інформації, однак у воєнних умовах це право часто обмежується. Забезпечення балансу між безпекою та прозорістю, екологічними правами є одним із ключових викликів сучасного правового регулювання.

Таким чином, війна в Україні продемонструвала системні недоліки існуючого нормативно-правового забезпечення екологічної безпеки. Основними проблемами є: високий поріг доказування екологічної шкоди; відсутність ефективних механізмів відповідальності; недостатня гармонізація національних і міжнародних стандартів; обмежена інституційна спроможність. Водночас сформувалися і нові підходи до вирішення цих проблем. Серед них: розвиток концепції екоциду; використання цифрових технологій для екологічного моніторингу; створення міжнародних компенсаційних механізмів; інтеграція екологічної політики у систему національної безпеки. У перспективі необхідним є формування комплексної моделі правового забезпечення екологічної безпеки, яка б включала: удосконалення міжнародного гуманітарного права; імплементацію екоциду як міжнародного злочину; гармонізацію національного законодавства з правом ЄС; створення єдиної системи оцінки збитків; розвиток механізмів відновлення довкілля. Лише за умови системного підходу можливо забезпечити ефективний захист довкілля та мінімізувати довгострокові наслідки війни для майбутніх поколінь.

1. United Nations Environment Programme. (2022). Environmental impact of the conflict in Ukraine: A preliminary review with case studies. <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review-case-studies>

2. Конституція України № 254к/96-ВР. 1996, 28 червня. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр>

3. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», 25 червня 1991 р. № 1264-XII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>

4. Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barceló, D. (2023). War impacts on soil. *Science of the Total Environment*, 856, 158930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158930>

5. Kumar, S., Al-Ansari, N., Dutt, S. (2022). Environmental damages of war. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(48), 72233–72242. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20926-w>

6. Protocol Additional to the Geneva Conventions of 12 August 1949, and Relating to the Protection of Victims of International Armed Conflicts (Protocol I), June 8, 1977. <https://ihl-databases.icrc.org/en/ihl-treaties/api-1977>

7. Rome Statute of the International Criminal Court, July 17, 1998. <https://www.icc-cpi.int/resource-library/core-legal-texts>

8. Duiunova, T., Voznyk, M., Koretskyi, S., Chernetska, O., Shylinhov, V. (2024). International humanitarian law and ecocide: The war in Ukraine as a case study. *European Journal of Environmental Sciences*, 14(1). <https://doi.org/10.14712/23361964.2024.2>

9. Кримінальний кодекс України № 2341-III. (2001, 5 квітня). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14>

10. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 4 квітня 2022 № 167. Про затвердження Методики визначення розміру шкоди, завданої землі, ґрунтам внаслідок надзвичайних ситуацій та/або збройної агресії та бойових дій під час дії воєнного стану <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0383-22>

11. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 21.07.2022 № 252 «Про затвердження Методики визначення збитків, заподіяних внаслідок забруднення та/або засмічення вод, самовільного користування водними ресурсами внаслідок збройної агресії Російської Федерації». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0898-22>

12. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 13.04.2022 № 175 «Про затвердження Методики розрахунку неорганізованих викидів забруднюючих речовин або суміші таких речовин в атмосферне повітря внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій

та/або під час дії воєнного стану та визначення розмірів завданої шкоди». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-22>

13. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 05.10.2022 № 414 «Про затвердження Методики визначення шкоди та збитків, заподіяних лісовому фонду внаслідок збройної агресії Російської Федерації». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1322-22>

14. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 13.10.2022 № 424 «Про затвердження Методики визначення шкоди та збитків, завданих територіям та об'єктам природно-заповідного фонду внаслідок збройної агресії Російської Федерації». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1382-22>

15. European Union, World Bank, United Nations Development Programme. (2013). Post-disaster needs assessments: Volume A. Guidelines. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/19030>

16. Directive 2004/35/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage. (2004). Official Journal of the European Union, L 143, 56-75. <http://data.europa.eu/eli/dir/2004/35/oj>

17. TEEB. (2010). The economics of ecosystems and biodiversity: Mainstreaming the economics of nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. Progress Press. <https://www.teebweb.org/publication/the-economics-of-ecosystems-and-biodiversity-teeb-mainstreaming-the-economics-of-nature-a-synthesis-of-the-approach-conclusions-and-recommendations-of-teeb/>

18. Convention on Nuclear Safety. (1994, June 17). International Legal Materials, 33(6), 1514-1546. <https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-conventions/convention-nuclear-safety>

United Nations. (2015). Paris Agreement. [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)

19. United Nations Economic Commission for Europe. (1998). Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-making and Access to Justice in Environmental Matters. <https://unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/documents/cep43e.pdf>

**Роман Людмила, Лабєцька Уляна**  
*ДВНЗ «Ужгородський національний університет»*

## **ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРИЗНОМАНІТТА НА ТЕРИТОРІЇ НПП «БОЙКІВЩИНА» В УМОВАХ ВІЙНИ**

Заповідні території є одними з найпопулярніших природних рекреаційних зон, а тому підлягають значному антропогенному впливу. У період воєнних дій на території держави особливо гостро дана проблема проявляється у природоохоронних територіях Карпатського регіону України. Останні стали ключовими у виконанні соціально-реабілітаційних функцій.

Національний природний парк (НПП) «Бойківщина» є унікальним осередком зростання червонокнижних видів рослин та середовищем існування рідкісних тварин [1, 2]. Поряд з тим він є простором для екологічного туризму, аеротерапії, гідротерапії, лісотерапії, тощо. Гірські мальовничі ландшафти, природні ліси, малі гірські річки створюють значний оздоровчий потенціал та приваблюють туристів, створюючи надмірний антропогенний тиск на природні екосистеми даної заповідної території [3, 4].

НПП «Бойківщина» є природним осередком 172 види хребетних тварин, з яких 34 червонокнижних. У Парку зростає близько 700 видів рослин, в тому числі 32 занесені до Червоної книги України. Значна частина НПП «Бойківщина» вкрита лісами [1, 2],

представленими здебільшого буковими, ялицево-буковими та вільховими породами. На тлі енергетичної кризи, внаслідок воєнних атак на енергосистеми держави посилилися випадки незаконної вирубки цінних карпатських лісів.

Оскільки територія НПП «Бойківщина» проходить по прикордонній зоні з червня 2023 року для туристів закритими стали три екостежки. Зокрема, забороненим є шлях до хутора Ліски, у якому відновлюють популяції рослин родини зозулинцевих. Тут зростають червонокнижні види: зозульки Фукса (*Dactylorhiza fuchsii*), коручка болотна (*Epipactis palustris*), зозульки плямисті (*Dactylorhiza maculata*) та інші.

У межах території НПП «Бойківщина» розташоване верхове болото «Надсяння». У 2019 році йому надано міжнародний статус водно-болотних угідь (Рамсарська конвенція). Дане болото має важливе екологічне, гідрологічне та біологічне значення. У межах угіддя зростає понад 200 видів судинних рослин. Тут зафіксовано 5 оселищ рослин з четвертого Додатку Бернської Конвенції та 11 видів, що входять до Червоної книги України. Серед них: росичка круглолиста (*Drosera rotundifolia*), зозульки м'ясо-червоні (*Dactylorhiza incarnata*), андромеда ряснолиста (*Andromeda polifolia*), плодоріжка болотна (*Orchis palustris*) та інші. Встановлено, що болото має належний екологічний стан, не зафіксовано негативних змін внаслідок надмірного антропогенного тиску. Воно також має важливе екологічне значення для природного функціонування водного басейну річки Сян.

1. Екологічний паспорт Львівської області за 2024 рік.  
URL: <https://drive.google.com/file/d/1iwqYOTdJTV9c3XS0BW-dBev-UbuG-DXZ/view>

2. Національний парк «Бойківщина». Офіційний веб-сайт. URL: <https://boikivshchyna-park.in.ua/pro-nas/pro-park/>.

3. Гафіяк, О.В., Симочко, Л.Ю. (2023). Екологічна оцінка трансформованих екосистем у карпатському регіоні. *Екологічні науки.*, 4(49), 177-185. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.23>

4. Zhylishchych, Yu., Krektun, B., Wiesinger, G., Khirivskyi, P., Salamakha, I., Panas, P., Hermanovych, O., & Korinets, Yu. (2025). Role of Nature-Oriented Eco-Recreational Practices in the Conservation of Ecotouristic and Biotic Potential of NNP «Boikivshchyna». *Bulletin of Lviv National Environmental University: Agronomy*, 15 (29), 44-51. DOI: 10.31734/agronomy2025.29.044.

**Романюк Юлія, Будішевська Ольга**  
*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ В ДОСЛІДЖЕННІ ХІТОЗАН-БЕНТОНІТОВИХ СОРБЕНТІВ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ІЗ СТІЧНИХ ВОД**

Зростаюча цифровізація наукових досліджень докорінно змінює підходи до розроблення нових екологічних матеріалів. Інтеграція сучасних інформаційних технологій у процес створення адсорбентів для очищення водних середовищ не лише підвищує ефективність роботи, а й відповідає принципам сталого розвитку – зокрема Цілі ООН № 6 (чиста вода та належна санітарія) [1].

Серед природних біополімерів особливий інтерес становить хітозан – полісахарид із відновлювальних джерел, що виявляє унікальну спорідненість до іонів важких металів завдяки наявності аміно- та гідроксильних функціональних груп. У поєднанні з бентонітом – алюмосилікатною глиною з розвиненою питомою поверхнею – він утворює композитні адсорбенти з покращеними структурними та сорбційними характеристиками. Такі хітозан-бентонітові системи розглядаються як перспективні біодеградабельні матеріали для деполіції побутових і промислових стічних вод [2].

Метою представленої роботи є демонстрація можливостей цифрових рішень на різних етапах дослідження зазначених систем: від попереднього скринінгу компонентів до прогнозування сорбційних характеристик та молекулярної візуалізації механізмів взаємодії.

На етапі попереднього скринінгу нових реагентів застосовано онлайн-ресурси PubChem (National Library of Medicine, США) та програму EPI Suite (EPA, США). Ці інструменти дозволяють провести *in silico* верифікацію фізико-хімічних параметрів та екотоксикологічного профілю речовин ще до початку лабораторних досліджень. Зокрема, комп'ютерна оцінка моноестеру трет-бутилпероксималеїнату, який виконує роль ініціатора та зшивального агента, підтвердила допустимість його застосування, що дозволило скоротити кількість попередніх дослідів та мінімізувати утворення хімічних відходів.

Ключовим елементом цифрового підходу стало застосування методів машинного навчання (ML) мовою Python у середовищі Google Colab для моделювання сорбційних процесів. На основі масиву експериментальних даних про видалення іонів  $\text{Cu}^{2+}$  спектрофотометричним методом – при значеннях рН 2,0; 4,0; 7,0; 9,0 та об'ємах розчину 25, 22, 32 і 35 мл – реалізовано метод множинної лінійної регресії. Отримана регресійна модель

$$c = 0,108 + 0,0048 \cdot \text{pH} - 0,0032 \cdot V$$

де  $c$  – залишкова концентрація міді ( $\text{мг/см}^3$ ),  $V$  – об'єм розчину (мл), характеризується коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,995$ , що свідчить про її високу прогностичну точність. Модель кількісно підтверджує позитивний вплив зростання рН на ефективність видалення  $\text{Cu}^{2+}$  та може бути використана для оперативної оцінки залишкової концентрації металів у дослідницьких або виробничих умовах.

Для візуального аналізу структури хітозану та механізмів його взаємодії з іонами металів і поверхнею бентоніту використано програму Avogadro та вебдодаток MolView. Автоматична генерація тривимірних молекулярних моделей із двовимірних структурних формул дозволяє наочно оцінити просторове розташування реакційноздатних аміно- та гідроксильних груп деградованого хітозану. Такий підхід полегшує передбачення характеру комплексоутворення з катіонами важких металів і специфіки взаємодії макромолекули з базальними площинами кристалічної ґратки мінерального носія.

Аналогічні цифрові підходи активно розвиваються у світовій практиці екологічних досліджень. Так, дослідницькі групи з Китаю, Індії та Бразилії успішно застосовують алгоритми ML (зокрема, випадковий ліс і штучні нейронні мережі) для прогнозування адсорбційної здатності різних сорбентів щодо важких металів у воді [3]. Команди Massey University (Нова Зеландія) та KU Leuven (Бельгія) демонструють ефективне поєднання молекулярної динаміки з методами DFT для моделювання механізмів сорбції на рівні атомарних взаємодій [4]. У США та країнах ЄС широко практикується включення баз даних PubChem та ChemSpider у трубопроводи автоматизованого хімічного скринінгу, що суттєво прискорює відбір безпечних компонентів для екологічних додатків. Описаний у даній роботі підхід узгоджується з цими тенденціями та адаптує передові практики до умов сучасних українських лабораторій.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням навчальної вибірки за рахунок залучення додаткових точок даних – варіювання концентрацій металів, температурних умов та різних мас сорбенту. Це створить підґрунтя для вдосконалення регресійної моделі та переходу до більш складних алгоритмів машинного навчання, зокрема методів опорних векторів (SVR) або градієнтного бустингу, що підвищить точність прогнозування в ширшому діапазоні параметрів системи.

Таким чином, комплексне використання екотоксикологічних баз даних, засобів машинного навчання та тривимірного молекулярного моделювання не лише прискорює розробку інноваційних еко-матеріалів, а й робить дослідницький процес більш економним та ресурсоощадним – що цілком відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та принципам зеленої хімії.

1. Khasri, A., & Ahmad, M. A. (2022). Adsorption of heavy metals onto chitosan-bentonite composites: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, 302, 114002. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114002>
2. Crini, G. (2019). Historical review on adsorptive removal of hazardous materials from water. *Journal of Environmental Management*, 233, 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.040>
3. Vo, A. H., Van Tran, T., & Nguyen, T. D. (2023). Machine learning approaches in predicting adsorption capacity of heavy metal ions onto various adsorbents: A review. *Chemosphere*, 316, 137812. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137812>
4. Uddin, M. K. (2017). A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438–462. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029>

**Сенета Зоряна**

*Національний лісотехнічний університет України,  
Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ПРОБЛЕМИ ТА НАПРЯМИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ**

Широкомасштабне військове вторгнення Росії в Україну спровокувало безпрецедентну екологічну кризу, глибоко вразивши природно-заповідний фонд (ПЗФ) країни. Понад 1,2 мільйона гектарів заповідних територій було пошкоджено, що становить понад 30 % усіх охоронюваних площ, включаючи біосферні заповідники, національні природні парки та регіональні ландшафтні парки. Найбільш постраждалі території розташовані у східній та південній частинах України, зокрема Чорноморський біосферний заповідник, «Меотида», «Асканія-Нова», а також Луганський та Рівненський природні заповідники [1].

В Україні частка територій природно-заповідного фонду є критично низькою та складає близько 8 % площі території держави. У більшості країн ЄС площі, зайняті природоохоронними територіями, становлять у середньому 15 %. Водночас Європейська зелена угода ставить за мету досягнення частки збережених природних екосистем на рівні до 30 % [2, 3].

До природно-заповідного фонду України належать: природні території та об'єкти – природні заповідники, біосферні заповідники, національні природні парки, регіональні ландшафтні парки, заказники, пам'ятки природи, заповідні урочища; штучно створені об'єкти – ботанічні сади, дендрологічні парки, зоологічні парки, пам'ятки природи, парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва [4].

Сьогодні війна руйнує не лише інфраструктуру та добробут українців, а й завдає непоправних ударів по довкіллю, перетворюючи наші природні багатства на зону екологічного лиха. В умовах російської воєнної агресії питання належного функціонування природоохоронних територій набуває особливої актуальності. Відповідно до Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року, стратегічною ціллю є збереження біорізноманіття та забезпечення розвитку природно-заповідного фонду в Україні [2, 5].

Однією з найгостріших проблем є безпосереднє фізичне руйнування природних екосистем. Вибухи, обстріли та пожежі призводять до знищення лісів, степів і водно-болотних угідь. Унаслідок бойових дій значних пошкоджень зазнали території тимчасово окупованого Біосферного заповідника «Асканія-Нова», де внаслідок пожежі вигоріла 1,8 га заповідної зони, що охоплює цілинні степові біотопи з охоронюваними угрупованнями рослинності, занесеними

до Зеленої книги України [6]. Значну шкоду було завдано території Національного природного парку «Святі гори» через масштабне знищення природних комплексів, внаслідок пожеж, спричиненими збройною агресією [7]. Масові пожежі, спричинені обстрілами, знищують унікальні природні комплекси, які формувалися століттями.

Зазнали негативного впливу внаслідок війни 96% українських водно-болотних угідь. Такий висновок наведено в «Остаточному звіті про оцінку екологічної шкоди водно-болотним угіддям міжнародного значення в Україні в результаті агресії Російської Федерації» [9]. Серед зафіксованих впливів:

- бомбові вирви;
- траншеї та військова інфраструктура;
- сміття;
- хімікати;
- шум та вібрації;
- пожежі;
- міни та боєприпаси, що не вибухнули;
- втрати персоналу, даних, обладнання;
- зниження фінансування;
- порушення гідрологічного режиму [8, 9].

Серйозною проблемою є мінування територій. Велика кількість вибухонебезпечних предметів робить природоохоронні зони небезпечними не лише для туристів, але й для науковців та працівників заповідників. Це фактично унеможливує здійснення екологічного моніторингу, охорони територій і проведення екскурсій.

В умовах війни суттєво послаблюється система управління заповідними територіями. Через небезпеку багато працівників змушені залишати свої робочі місця. Це призводить до зниження контролю за територіями та відкриває можливості для незаконної діяльності – браконьєрства, незаконної вирубки лісів і видобутку ресурсів.

Внаслідок шуму, вибухів і знищення середовища існування тварини змушені змінювати ареали проживання або гинуть. Особливо страждають рідкісні та зникаючі види, які охороняються міжнародними конвенціями.

Окремою проблемою є забруднення довкілля. Військова техніка, паливно-мастильні матеріали, уламки боєприпасів і токсичні речовини потрапляють у ґрунт і воду, що має довготривалі негативні наслідки. Наприклад, у районах активних бойових дій на сході України зафіксовано значне погіршення якості води та ґрунтів.

Екологічні наслідки, які спричинені унаслідок війни потребують не лише оцінки, а й комплексного реагування на державному рівні. Саме тому особливої актуальності набуває розробка ефективних природоохоронних заходів у складних умовах воєнного стану.

Стратегічні напрями охорони та збереження об'єктів природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану повинні передбачати комплекс системних природоохоронних заходів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу воєнних дій та забезпечення довгострокового збереження екосистем, зокрема:

- моніторинг стану природних екосистем, включаючи регулярне дистанційне та польове спостереження за змінами в межах природно-заповідних територій;
- оцінку та ліквідацію екологічних наслідків бойових дій, зокрема забруднення ґрунтів, водних ресурсів і повітря токсичними речовинами;
- посилення охоронного режиму об'єктів ПЗФ, у тому числі шляхом обмеження доступу до найбільш вразливих територій та залучення спеціалізованих підрозділів для охорони природи;
- відновлення пошкоджених екосистем, що включає рекультивацію земель, відновлення рослинного покриву та біорізноманіття;

– удосконалення нормативно-правової бази, спрямоване на врахування екологічних ризиків воєнного стану та підвищення рівня відповідальності за завдання шкоди природним територіям;

– міжнародну співпрацю та залучення фінансової і технічної допомоги для реалізації природоохоронних і відновлювальних заходів.

Природно-заповідний фонд України в умовах воєнного стану зазнає комплексного та часто незворотного впливу, що проявляється у руйнуванні природних екосистем, забрудненні ґрунтів і вод, скороченні біорізноманіття та порушенні природоохоронного режиму територій. Воєнні дії суттєво ускладнюють реалізацію традиційних механізмів охорони природи, що потребує адаптації системи управління природно-заповідними територіями до нових викликів.

Узагальнення проблем дозволяє визначити ключові напрями їх подолання, серед яких пріоритетними є посилення моніторингу стану екосистем, оперативна оцінка та мінімізація екологічних наслідків бойових дій, удосконалення нормативно-правового забезпечення, відновлення порушених природних комплексів, а також розвиток міжнародної співпраці у сфері екологічної безпеки.

Охорона природно-заповідного фонду України в умовах воєнного стану потребує комплексного, науково виваженого та міжгалузевого підходу, який інтегрує заходи оперативного реагування на екологічні загрози з довгостроковими стратегіями відновлення природних екосистем і забезпечення сталого природокористування.

1. Uvaieva, O., Shevchuk, L., Herasymchuk, O., & Vasilieva, L. (2025). Impact of military operations on the nature reserve fund of Ukraine. *Environmental Problems*, 10 (3), 259–268. <https://doi.org/10.23939/ep2025.03.259>

2. Іванюта, С. (2025). *Пріоритети збереження й відновлення природоохоронних територій і біорізноманіття України*. Національний інститут стратегічних досліджень. <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/natsionalna-bezpeka/priorytety-zberezhennya-y-vidnovlennya-pryrodoookhoronnykh>

3. European Commission. *The European Green Deal. Striving to be the first climate-neutral continent*. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)

4. Природно-заповідний фонд України. *Природно-заповідний фонд*. <https://wownature.in.ua/oberihaymo/pryroдно-zapovidnyy-fond/>

5. Кабінет Міністрів України. (2021, 20 жовтня). *Про схвалення Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року* (Розпорядження № 1363-р). Верховна Рада України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80#Text>

6. У заповіднику «Асканія-Нова» внаслідок пожежі постраждали цілинні степові біотопи. <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/4103680-u-zapovidniku-askanianova-vnaslidok-pozezi-postrazdali-cilinni-stepovi-biotopi.html>

7. Збитки внаслідок знищення природних комплексів через збройну агресію нанесені НПП "Святі гори" перевищили 2 трлн. грн. <https://don.dei.gov.ua/post/536>

8. Національний екологічний центр України. *96% українських Рамсарських угідь постраждали від війни*. <https://necu.org.ua/96-ukrayinskyh-ramsarskyh-ugid-postrazhdaly-vid-vijny/>

9. Ramsar Convention Secretariat. (2025, January). *Assessment report of environmental damage on wetlands of international importance in Ukraine stemming from the Russian Federation's aggression (Final report)*. [https://www.ramsar.org/sites/default/files/2025-04/COP15\\_inf2\\_implementation\\_ResXIV20\\_assessment\\_report\\_e.pdf](https://www.ramsar.org/sites/default/files/2025-04/COP15_inf2_implementation_ResXIV20_assessment_report_e.pdf)

## **ВПЛИВ ЕКОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ СІМЕЙНОГО БІЗНЕСУ ПІД ЧАС ВІЙНИ**

Сьогодні ніхто не стане заперечувати, що розвиток сімейного господарства є чи найважливішою проблемою держави і суспільства. Створення сприятливих умов для кожної сім'ї – це нагальне завдання будь-якої прогресивної держави.

Зважаючи на споконвічні корені в менталітеті українського народу до підприємництва, необхідно створити відповідне правове поле для успішного процвітання сімейних господарств, особливо під час війни. Адже сімейний бізнес в Україні вважається традиційною, найдавнішою та, напевно, основуючись на багатьох параметрах, найефективнішою моделлю ведення малого бізнесу, не даремно найстарішими компаніями у світі є саме сімейні компанії.

В економічній науці часто говорять про феноменальний розвиток сімейного підприємництва в сільському господарстві, зеленому туризмі. Стійкість і ефективність сімейного господарства пояснюється орієнтацією не так на прибуток, як на потреби сім'ї, високою моральною цінністю праці, екологічністю, а найголовніше високою мотивацією до праці господаря порівняно з найманим працівником. Саме тому стратегічним ресурсом держави повинна стати сім'я та підтримка сімейного бізнесу.

Сімейний бізнес має довгострокову стабільність, відповідальність, цінність самого підприємства, він несе принципово інший підхід до організації справи. Так у Європі 70–80% підприємств є сімейним бізнесом (в основному це 3–4 покоління), вони становлять 40–50% зайнятості населення в таких секторах, як сільське господарство, виробництво, будівництво, туризм і роздрібна торгівля. Саме тому сімейні підприємства вважаються бізнесом, який робить вагомий внесок у розвиток економіки європейських держав.

Війна, яка почалась у 2022 році стала великим викликом для бізнесу в Україні і особливо для сімейного. Враховуючи воєнні ризики, руйнування інфраструктури, відтік кадрів, зниження попиту, логістичні проблеми, фінансові труднощі (зокрема, обмежений доступ до кредитування та зростання собівартості) та регуляторні перешкоди, сімейний бізнес став «феноменом» підприємницької діяльності. Він як першопроходець, акцентує увагу на чистоту навколишнього середовища, а отже і на те, щоб існуюча діяльність відповідала, в першу чергу, природоохоронному законодавству, мала чинні дозволи, вела звітність і не шкодила довкіллю.

Маючи невелику кількість працівників, які швидко пристосовуються до змін на ринку, здійснено поворот до позитивних господарських процесів. Багато сімей активно почали спрямовувати свою діяльність на створення бізнесу направленого на виготовлення екологічно чистої продукції, впровадження новітніх технологій, утилізації відходів та використання відновлювальних джерел енергії, які зменшують негативний вплив на довкілля, а й приносять реальні вигоди – скорочення витрат, підвищення ефективності, відкриття нових ринків збуту.

З'явилися нові мініпекарні, невеликі виробництва напівфабрикатів, ремонтні майстерні, сімейні аграрні фірми, сімейні зони відпочинку, зелений туризм тощо.

Враховуючи те, що попит на екологічно чисті продукти зростає, а покупці дедалі частіше звертають увагу не лише на ціну, а й на походження товару, спосіб його виробництва, пакування, можливість переробки сімейні господарства виконують свою основну функцію – постачають на ринок екологічно чисту продукцію. А молодь, яка є основною рушійною силою нових трендів, обирає бренди, що поділяють їхні цінності. За даними міжнародного дослідження Nielsen, понад 70% споживачів готові платити більше за продукцію компаній, які дбають про природу. І ця тенденція з кожним роком тільки посилюється.

Отже, сімейний бізнес демонструє, що в умовах війни реально можна працювати і отримувати прибутки, якщо економно та ощадливо використовувати обмежені економічні

ресурси. Так використання енергоощадливого обладнання чи відмова від паперового документообігу можуть сприяти економічній ефективності підприємства. Використання чистих джерел енергії, таких як вітрова та сонячна можуть зробити впливові кроки на шляху до стабільності не тільки у власній сім'ї, але й на державному рівні. Можуть постачати на ринок екологічно чисті продукти, вирощені на власних ділянках. Відновлення сил на свіжому повітрі – важливий чинник для багатьох людей. Тому в сімейному бізнесі «зелений туризм» вже посів одне з чільних місць. Тут слід врахувати, що «зелений туризм» пропонує екологічно чисте житло, екскурсії та здорову їжу. Цей бізнес інтенсивно почав розвиватись в Карпатському регіоні ще до війни. А зараз, враховуючи наслідки бомбардувань, люди потребують набратись сили. Велосипед – екологічно чистий засіб пересування, тому маючи бізнес у сфері продажу, ремонту і оренді велосипедів підприємець долучається до екологічного оздоровлення свого регіону, отримуючи при цьому грошові доходи.

Сімейний бізнес демонструє свою гнучкість, «живучість», зміцнюючи і підтримуючи національну економіку. Саме він створює робочі місця, наповнює місцеві бюджети та підтримує життєздатність громад у воєнний час. І хоча частина підприємців вимушено закривається, інші доводять, що навіть під час війни можна знаходити можливості для розвитку.

1. Екологічна трансформація бізнесу: українські реалії та можливості. URL: <https://welfare.green/ekologichna-transformaciya-biznesu-ukrainski-realii-ta-mozhливosti/>

**Трайдук Надія**  
*Бердянський державний педагогічний університет, м. Запоріжжя, Україна*  
**Несторенко Олександр**  
*Сілезька академія, м.Катовіце, Польща*

## **ЗЕЛЕНА ВІДБУДОВА УКРАЇНИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В УМОВАХ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ**

Військова агресія проти України спричинила критичні загрози екологічній безпеці, що потребує не просто відновлення зруйнованого, а докорінної трансформації економічної моделі. В умовах євроінтеграції «зелена відбудова» (Green Recovery) стає ключовим інструментом мінімізації воєнно-екологічних ризиків та забезпечення стійкості національної економіки відповідно до стандартів European Green Deal (European Commission, 2019) та Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age (European Parliament, 2026).

Ефективна реалізація стратегії зеленої відбудови України потребує глибокого теоретичного підґрунтя, що поєднує екологічні, економічні та інституційні аспекти. Фундаментальні принципи «зеленої економіки» для вітчизняного контексту розкрито у роботі (Боровик та ін., 2020), автори якої доводять, що така модель є не просто екологічною ініціативою, а стратегічною перспективою для підвищення національної конкурентоспроможності. В умовах воєнного стану ця концепція набуває нових рис стійкості. Зокрема, в дослідженні Т. Несторенко (2025) обґрунтовує необхідність застосування

сценарного підходу для забезпечення сталого розвитку організацій та інституцій, що безпосередньо корелює з потребою МСБ адаптуватися до ризиків війни. Оскільки зелена відбудова є невід’ємною частиною євроінтеграційного поступу, важливого значення набуває розвиток економіки знань. В праці (Ажажа та ін., 2026) наголошується, що драйвером формування такої економіки виступає підприємницький університет, який через інституційні механізми стимулює впровадження інновацій, необхідних для сталого розвитку. Це підтверджує тезу про те, що екологічна безпека потребує якісної трансформації освітнього та наукового простору, оскільки доступ до сучасних знань є базовим фактором якості життя та реалізації глобальних цілей сталого розвитку. Особливе місце у процесі відбудови посідають технологічні рішення. Як зазначається у колективній монографії (Буркинський та ін., 2024), поєднання сталого розвитку з цифровими інноваціями створює синергетичний ефект, дозволяючи бізнесу не лише відновлюватися, а й здійснювати технологічний стрибок (leapfrogging). Таким чином, аналіз напрацювань провідних вчених дозволяє стверджувати, що зелена відбудова України – це комплексний процес, де цифровізація, інноваційна освіта та державна екологічна політика виступають єдиним інструментом забезпечення екологічної безпеки в умовах інтеграції до ЄС.

Сталий розвиток у сучасних умовах є не лише глобальною стратегією, а й критичним орієнтиром для трансформації економіки України. В умовах воєнної агресії питання «зеленої відбудови» набуває стратегічного безпекового значення: воно передбачає одночасне подолання наслідків екоциду та забезпечення євроінтеграційного курсу через впровадження екологічно орієнтованих стандартів. Особливої ваги це набуває для малого та середнього бізнесу (МСБ), який є фундаментом економічної стійкості та соціальної стабільності регіонів.

Екологічна безпека в умовах війни виходить за межі суто природоохоронних заходів і стає складником національної безпеки. Для МСБ адаптація до екологічних стандартів ЄС є стратегічним викликом і водночас можливістю для залучення міжнародних інвестицій у відбудову. Використання інформаційних технологій для моніторингу довкілля та оптимізації ресурсів дозволяє бізнесу знизити операційні ризики, спричинені дефіцитом енергоносіїв. Ключові інструменти цієї трансформації та їхній вплив на безпековий і конкурентний потенціал бізнесу узагальнено в таблиці 1.

Таблиця 1

#### Інструменти зеленої відбудови

| Інструмент відбудови                | Безпековий аспект (в умовах війни)                           | Вплив на євроінтеграцію та конкурентоспроможність         | Практична реалізація                                  |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Децентралізована енергетика (ВДЕ)   | Енергонезалежність підприємств під час атак на енергосистему | Відповідність вимогам СВМ (вуглецеве коригування імпорту) | Встановлення сонячних панелей та теплових насосів     |
| Енергоефективні технології          | Зменшення навантаження на пошкоджену критичну інфраструктуру | Зниження собівартості продукції та підвищення маржі       | Модернізація ліній, LED-освітлення, термомодернізація |
| Циркулярні моделі (Waste-to-Energy) | Ефективне управління відходами руйнувань та виробництва      | Ресурсна незалежність та залучення "зелених" грантів ЄС   | Переробка відходів агросектору в біопаливо            |
| Еко-сертифікація та IT-моніторинг   | Прозорість оцінки екологічних збитків та ризиків             | Усунення технічних бар’єрів для виходу на ринки ЄС        | Впровадження ISO 14001, цифровий еко-аудит            |

Джерело: розроблено авторами.

Впровадження «зелених» практик здатне створювати конкурентні переваги та сприяти залученню інвестицій. Інтеграція принципів енергоефективності та цифровізація створюють нові можливості для МСБ, забезпечуючи доступ до європейських ринків. Основні інструменти та їхній вплив представлені в таблиці 2.

**Вплив інструментів зеленої відбудови на конкурентоспроможність  
малого та середнього бізнесу в Україні**

| Інструмент зеленої відбудови                          | Очікуваний ефект для бізнесу                                    | Вплив на конкурентоспроможність                                 | Приклад для України                                                 |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Енергоефективність будівель та виробництв             | Зменшення витрат на енергію, зниження екологічного навантаження | Підвищення маржі та привабливості для інвесторів                | Впровадження LED-освітлення та теплоізоляції у виробничих цехах     |
| Використання відновлюваних джерел енергії             | Зменшення залежності від традиційних ресурсів                   | Зниження операційних ризиків та витрат                          | Сонячні панелі на фермерських господарствах, малі вітрові установки |
| Екологічне виробництво та сертифікація                | Доступ до європейських ринків, підвищення довіри споживачів     | Можливість експорту та формування бренду «зелений продукт»      | Органічні продукти та сертифікація ISO 14001                        |
| Повторне використання ресурсів (циркулярна економіка) | Зменшення витрат на сировину, утилізацію та відходи             | Оптимізація виробництва, підвищення ефективності                | Виробництво біопакетів з відходів агропромисловості                 |
| Цифровізація та «зелені» технології управління        | Підвищення прозорості та контролю за ресурсами                  | Збільшення швидкості прийняття рішень, ефективність менеджменту | Впровадження ERP-систем для моніторингу енергоспоживання            |

Джерело: розроблено авторами

Зелена відбудова включає інтеграцію принципів енергоефективності, використання відновлюваних джерел енергії, екологічне виробництво, повторне використання ресурсів та зменшення викидів парникових газів. Поєднання цих практик з фінансовими інструментами та цифровізацією створює нові можливості для МСБ, забезпечує доступ до європейських ринків і дозволяє уникати торговельних бар'єрів.

Суттєвими викликами залишаються високі стартові витрати, обмежений доступ до фінансування, складність отримання грантів, низький рівень обізнаності підприємців щодо «зелених» інновацій та бюрократичні перепони. Для подолання цих бар'єрів необхідне створення сприятливого середовища через державні програми, пільгове кредитування, навчальні ініціативи та розвиток міжнародного партнерства.

Досвід країн ЄС підтверджує, що інтеграція екологічних стандартів у бізнес-моделі МСБ підвищує ефективність, знижує екологічні ризики і формує конкурентні переваги. В Україні успішні кейси вже спостерігаються у сфері енергоефективності, екологічного агробізнесу, екотуризму та «зеленого» експорту, що демонструє практичну користь від впровадження зелених практик.

Таким чином, зелена відбудова України виступає стратегією не лише відновлення економіки після воєнних руйнувань, а й формування довгострокового конкурентного розвитку малого та середнього бізнесу, здатного адаптуватися до викликів глобального ринку та інтегруватися в європейську економіку.

1. Ажажа, М., Несторенко, Т., & Пеліова, Я. (2026). Підприємницький університет як драйвер формування конкурентоспроможності економіки знань у контексті сталого розвитку: теоретико-методологічні засади та інституційні механізми розвитку. *Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології*, 1 (147), 425-455. <https://doi.org/10.24139/2312-5993/2026.01/425-455>

2. Боровик, Ю.Т., Єлагін, Ю.В., & Полякова, О.М. (2020). «Зелена економіка»: сутність, принципи, перспективи для України. *Вісник економіки транспорту і промисловості*, 69, 75–83. <https://doi.org/10.18664/338.47:338.45.v0i69.200551>
3. Буркинський, Б.В. та ін. (ред.). (2024). *Сталий розвиток і цифрові інновації* : монографія. НАН України, МОН України, ДУ «Ін-т ринку та екон.-екол. дослідж.», Держ. ун-т інтелект. технологій і зв'язку. ДУ «ІРЕД НАНУ», 2024.
4. Несторенко, Т. (2025). Сценарний підхід до забезпечення сталого розвитку переміщених університетів під час війни. *Український журнал прикладної економіки та техніки*, 10 (1), 232–236. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-1-38>
5. Несторенко, Т., Макаренко, Т., & Зубро, Т. (2017). Доступ до освіти як фактор якості життя: реалізація в Україні цілей сталого розвитку. *Conference Proceedings of the II International Scientific Internet-Conference “Modern Problems of Improve Living Standards in a Globalized World”* (December 8, 2017, Opole – Berdyansk – Tbilisi – Slovyansk – Kropyvnytsky), 499. URL: <https://lnk.ua/XujQ178Wa>
6. European Commission (2019). *European Green Deal*. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
7. European Parliament (2026). *Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age*. URL: <https://lnk.ua/cwTnDXJUI>

**Угрин Леся**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**  
**Александр Остенда**  
**Сілезька академія, м.Катовіце, Польща**

## **ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНІВ ЕКОСИСТЕМ ТЕРИТОРІЙ ПРИРОДО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ**

Геоінформаційні системи виступають одним із провідних інструментів для організації моніторингу та прогнозування екологічного стану територій природно-заповідного фонду. Використання просторових баз даних у поєднанні з матеріалами дистанційного зондування Землі, результатами польових обстежень, сенсорними спостереженнями та інтелектуальними методами опрацювання інформації забезпечує перехід від збору даних по окремих параметрах до комплексного аналізу змін у природних системах заповідного фонду (ESA, nd). Особливо важливою є роль ГІС у локалізації проблемних зон, де можливі потенційні екологічні ризики, та у місцях, які потребують інформаційного супроводу природоохоронних управлінських рішень. Ефективне управління об'єктами природно-заповідного фонду потребує засобів, які дають змогу відображати стан екосистем одночасно у просторовому та часовому вимірах (Угрин, 2023).

Актуальність цього напрямку досліджень визначається потребою інтегрувати сучасні цифрові технології з математичними підходами до аналізу та прогнозування станів територій природних резерватів. Найбільший науковий та прикладний інтерес становить поєднання геоінформаційних систем із хмарними геоаналітичними сервісами, сенсорними мережами та інструментами штучного інтелекту.

Метою дослідження є розроблення науково-методичного підходу до моніторингу та прогнозування стану екосистем природно-заповідного фонду на основі геоінформаційних технологій із залученням актуальних просторових даних та сучасних інтелектуальних засобів обробки інформації.

Традиційні моделі спостереження, що ґрунтуються на періодичних дослідженнях та розрізних звітних матеріалах, вже не відповідають вимогам оперативності та повноти оцінювання. За таких умов геоінформаційні системи набувають значення єдиного інтеграційного середовища, в якому можуть об'єднуватися різноманітні екологічні дані, а також реалізовуватися процедури аналізу, моделювання та наочної візуалізації. Для природоохоронних територій це особливо суттєво, адже вони відзначаються значною екологічною цінністю, складною просторовою структурою та високою чутливістю до кліматичних та антропогенних змін. Як об'єкт дослідження розглянуто біосферний резерват «Розточчя», для якого важливим є контроль стану лісових екосистем, динаміки вологості та рівня рекреаційного навантаження (UNESCO, nd). Тому екологічний моніторинг у таких резерватах має передбачати не лише фіксацію окремих характеристик, а й аналіз взаємозалежностей між компонентами екосистем та оцінювання ймовірних змін у майбутньому (Угрин, 2024).

У системі екологічного моніторингу ГІС реалізує ряд взаємодоповнювальних функцій. Передусім вона забезпечує накопичення, систематизацію та зберігання просторово пов'язаних відомостей про рослинний покрив, ґрунти, водні ресурси, метеорологічні параметри, антропогенне навантаження та функціональне зонування території. Крім того, ГІС дає можливість поєднувати інформацію з різних джерел, зокрема, супутникові знімки, результати польових спостережень, лабораторні дослідження та відкриті набори геоданих. Водночас така система формує аналітичне середовище для виявлення просторових закономірностей, відстеження динаміки змін та подання результатів у формі картографічних моделей або динамічних графіків. Для оцінювання стану екосистем доцільно застосовувати систему показників, об'єднаних у кілька змістових блоків: біофізичні характеристики рослинності, гідротермічні параметри, показники якості природних компонентів, інтенсивність антропогенного впливу та просторові індикатори фрагментації. На основі такої інформації може бути побудований інтегральний індекс екосистемного стану, який дозволяє узагальнити різноманітні вимірювання та подати їх у вигляді зрозумілої шкали - від сприятливого до критичного стану. Геоінформаційна система моніторингу має підтримувати кілька послідовних стадій аналітичного опрацювання даних: первинну підготовку інформації, що включає геоприв'язку, трансформацію координат та уніфікацію атрибутивних структур; створення геобаз за межами територій, функціональними зонами, гідрографією, лісовими кварталами, пунктами спостереження, маршрутами та сенсорними позиціями; обчислення індикаторів, зокрема спектральних індексів, статистичних характеристик за зонами, часових трендів та показників фрагментації; просторове моделювання, яке охоплює інтерполяцію спостережень, побудову ризикових поверхонь, сценарний аналіз та картографування прогнозованих станів; а також візуалізацію та інтерпретацію результатів через тематичні карти, часові ряди, дашборди, порівняльні панелі та автоматизовані звіти. Можливості ГІС в сфері прогнозування суттєво посилюються за умови її інтеграції з нечіткою логікою та методами машинного навчання. Нечіткі правила є доцільними для трактування екологічних ситуацій, у яких неможливо провести чітку межу між нормальним та проблемним станом. У свою чергу, алгоритми машинного навчання можуть застосовуватися для класифікації станів, виявлення прихованих залежностей між параметрами та побудови короткострокових сценаріїв розвитку екосистем під впливом природних чи антропогенних факторів.

Практична значущість такого підходу полягає в тому, що геоінформаційна система перестає бути лише засобом картографування і перетворюється на інструмент підтримки управлінських рішень. Вона надає можливість оперативно виявляти проблемні ділянки, визначати пріоритети спостережень, обґрунтовувати обмеження рекреаційного навантаження та планувати відновні заходи. Це є актуальним для різних об'єктів природно-заповідного фонду.

Для Розточчя визначальним є транскордонний характер території, для Бескидів – висотна диференціація природних комплексів та ризики лісових порушень, а для Яворівського національного природного парку – поєднання охоронної, рекреаційної та еколого-освітньої функцій.

Отже, геоінформаційні системи можна розглядати як ключовий інструмент моніторингу та прогнозування стану екосистем природно-заповідного фонду. Їх застосування забезпечує інтеграцію різнотипних даних, просторово-часовий аналіз екологічних процесів та формування аналітичних матеріалів, необхідних для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Поєднання ГІС із дистанційним зондуванням, спостереженнями та інтелектуальними методами аналізу підвищує точність оцінювання стану екосистем та розширює можливості раннього виявлення негативних тенденцій. Тому впровадження подібних систем на територіях природно-заповідного фонду України є важливим напрямом цифрової трансформації екологічного моніторингу.

1. European Space Agency. (n.d.). *Sentinel-2 mission*. Copernicus Data Space Ecosystem. <https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-missions/sentinel-2>
2. Google Earth Engine. (n.d.). *Geospatial analysis platform for planetary-scale environmental data*. University of Texas Libraries. <https://guides.lib.utexas.edu/c.php?g=873262&p=10853859>
3. Harnessing online digital data in biodiversity monitoring. (2024). *PLOS Biology*, 22(1), Article e3002497. <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3002497>
4. UNESCO. (n.d.). *Roztocze Biosphere Reserve*. <https://www.unesco.org/en/mab/roztocze>
5. Угрин, Л. Є. (2023). Аналіз станів територій природозаповідного фонду загальнодержавного значення. У [Назва збірника/конференції] (с. 41–42). Катовіце.
6. Угрин, Л. Є. (2024). *Система моніторингу екологічної безпеки територій регіонів* [Монографія/Звіт]. Катовіце.

**Федонюк Віталіна, Чабанчук Ірина**  
*Луцький національний технічний університет*

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІКТ ТА ДЗЗ ПРИ АНАЛІЗІ НАСЛІДКІВ ОБСТРІЛІВ СХОВИЩ ПММ**

У наш час питання екологічної безпеки набуває першочергового значення як складова сталого розвитку. Воєнні дії, що відбуваються на території України, формують суттєві ризики для навколишнього середовища, зокрема внаслідок обстрілів об'єктів інфраструктури, пов'язаних зі зберіганням і використанням паливно-мастильних матеріалів (далі – ПММ). Такі події можуть спричинити тривалі негативні наслідки, що відображаються на стані екосистем, здоров'ї населення та якості природних ресурсів. Західна частина України, якій притаманна розгалужена система складів і резервуарів ПММ, перебуває у зоні підвищеної небезпеки через потенційні військові удари. Враховуючи стратегічне значення цього регіону як резервної бази, проблема впливу обстрілів відповідних об'єктів на довкілля є надзвичайно актуальною [2]. Зростання кількості техногенних аварій, викликаних воєнними діями, додатково загострює актуальність дослідження. Ураження сховищ ПММ супроводжується масштабними викидами

токсичних сполук у атмосферу, ґрунтове середовище та водні об'єкти, що порушує екологічну рівновагу та становить серйозну загрозу для здоров'я населення, оцінку наслідків таких процесів дозволяють полегшити методи аналізу супутникових знімків з розпізнаванням та класифікацією зображень [1, 2, 3].

Особливої ваги ця проблематика набуває в умовах кліматичних змін, коли екосистеми стають більш чутливими до антропогенного впливу [4]. Водночас недостатній рівень вивченості локальних екологічних наслідків обстрілів у Західному регіоні України підкреслює потребу у комплексному та системному підході до аналізу й розв'язання проблеми. Тому метою дослідження була оцінка екологічних наслідків обстрілів сховищ ПММ у Західному регіоні України методами ІКТ та ДЗЗ та розробка рекомендацій щодо мінімізації їх негативного впливу на довкілля. У табл. 1 узагальнено основні негативні екологічні наслідки аварій на об'єктах зберігання ПММ.

Таблиця 1. Екологічні наслідки аварій у місцях зберігання ПММ (узагальнено за даними [2])

| Параметр                         | Опис                                                                                                                                        |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Шлях поширення токсичних речовин | Атмосфера, ґрунт                                                                                                                            |
| Джерела токсичних речовин        | Вибухи, займання ПММ                                                                                                                        |
| Продукти горіння                 | Вуглеводні, діоксини, чадний газ (CO), оксиди азоту (NO <sub>x</sub> ), оксиди сірки (SO <sub>x</sub> ), поліциклічні ароматичні вуглеводні |
| Температура горіння              | 1000–1200°C                                                                                                                                 |
| Канцерогенні сполуки             | Поліциклічні ароматичні вуглеводні                                                                                                          |
| Викиди та забруднення            | До 30% сажі та твердих часток, які осідають на території, забруднюючи рослинність і водойми                                                 |
| Атмосферні забруднення           | Утворення кислотних дощів (сірчана та азотна кислоти), закислення ґрунтів, руйнування рослинності, зміна хімічного складу водойм            |
| Забруднення ґрунтів              | Нафтопродукти, важкі метали (свинець, кадмій, ртуть), феноли, сульфід                                                                       |
| Токсичний вплив на ґрунт         | Порушення мікробіологічного складу ґрунту, зниження родючості, токсичний вплив на рослинний покрив                                          |
| Тривалість забруднення           | Деякі десятиліття (до 15–20 років для дизельного пального, понад 30 років для важких фракцій нафти)                                         |
| Вплив на екосистеми              | Негативний вплив на с/г угіддя та ліси, зниження врожайності, надходження токсичних сполук у харчовий ланцюг                                |

На рис. 1 представлено узагальнені дані щодо наслідків обстрілів сховищ ПММ у Західному регіоні України, отримані шляхом застосування методів ДЗЗ та пошуку інформації у відкритих джерелах.

| Місцерозташування складу ПММ                   | Дата обстрілу | Тип ураження   | Додаткова інформація                                                                                                                   |
|------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| м. Луцьк (Волинська обл.)                      | 27.03.2022 р  | Авіаудар       | Знищені всі запаси нафтопродуктів на нафтобазі. Сума збитків становить понад 136 мільйонів гривень.                                    |
| м. Ковель (Волинська область)                  | 27.03.2022 р  |                |                                                                                                                                        |
| м. Дубно (Рівненська обл.)                     | 27.03.2022 р  | Крилата ракета | Горіння нафтопродуктів тривало понад 2 дні.                                                                                            |
| Рівненський район, Рівненська обл. смт Клевани | 28.03.2022 р  | Крилата ракета | <u>Пожежа тривала 2 дні. Відкрито кримінальну справу про екоцид</u>                                                                    |
| м. Львів                                       | 26.03.2022 р  | Крилата ракета | Нафтобаза повністю зруйнована                                                                                                          |
| м. Тернопіль                                   | 03.04.2022 р  | Крилата ракета | Пожежа середньої інтенсивності.                                                                                                        |
| с. Буша (Дубенський район, Рівненська обл.)    | 10.08.2023 р  | БПЛА           | Загоряння ряду резервуарів з паливом                                                                                                   |
| м. Кременець (Тернопільська обл.)              | 10.08.2024 р  | БПЛА           | Тривала пожежа                                                                                                                         |
| смт. Смига (Дубенський район, Рівненська обл.) | 10.08.2024 р. | БПЛА           | Знищено ряд резервуарів з паливом                                                                                                      |
| Тернопіль                                      | 20.08.2024 р. | БПЛА           | <u>Пожежу ліквідували за допомогою 20 одиниць техніки та понад 90 рятувальників. Залучалися 2 пожежні поїзди з Тернополя та Львова</u> |
| Івано-Франківська обл.                         | 13.09.2024 р. | БПЛА           | <u>Масштабна пожежа</u>                                                                                                                |

Рис. 1. Хронологія та наслідки обстрілів сховищ ПММ у Західному регіоні України протягом весни 2022 – осені 2024 рр.

Оцінка екологічних наслідків результатів техногенних аварій на об'єктах такого типу (в тому числі і наслідків обстрілів та наступних пожеж) із застосуванням методів дистанційного зондування Землі дозволяє: 1) провести порівняльний аналіз стану об'єкту до та після аварії; 2) оцінити локалізацію, масштаби розповсюдження і тривалість пожеж; 3) провести моделювання поширення токсичних сполук у атмосферному повітрі (за умови врахування метеорологічних чинників); 4) оцінити пролонговані наслідки (площу забруднених ґрунтів та ділянок природних ландшафтів, тощо).

1. Іванців, В.В., Федонюк, В.В. & Федонюк, М.А. (2025) Особливості методичних підходів до викладання картографічних курсів в умовах війни. *Russia-Ukraine War: Consequences for the World: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Internet Conference*, January 30-31, 2025. FOP Marenichenko V.V., Dnipro. 111 – 113. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2025/02/Conference-Proceedings-January-30-31-2025-1.pdf>

2. Stelmakh, V., Pavlovska, T., Fedoniuk, V., Biletskyi, Yu. & Zaporozhets A. (2026). Impact of Military Operations on the Hydrochemical Composition of Aquatic Ecosystems in Ukraine. In: Zagorodny, A., Bogdanov, V., Zaporozhets, A., Ermolieva, T. (eds) *Nexus of Sustainability. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 627. Springer, Cham. 547 – 568. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-03616-2\\_23](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-032-03616-2_23) DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-032-03616-2\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-032-03616-2_23)

3. Федонюк, В.В., Федонюк, М.А. & Панькевич, С.Г. (2013). Досвід використання програми Google Earth при викладанні географічних дисциплін. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 6 (38). 138 – 148. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ITZN\\_2013\\_38\\_6\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ITZN_2013_38_6_14)

4. Федонюк, В.В., & Федонюк, М.А. (2021). Застосування ІКТ при викладанні дисциплін метеорологічного циклу. *Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій Землі: наслідки та шляхи вирішення*: Збірник наукових праць IV Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 10-11 червня 2021 року. ДВНЗ «ХДАУ». 316 – 319.

### **СЕКЦІЯ 3. ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ЕКОНОМІКИ В КОНТЕКСТІ ФОРМУВАННЯ ЗЕЛЕНОГО МАЙБУТНЬОГО КРАЇН ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ**

**Ангелко Ірина**

*Національний університет «Львівська політехніка»*

#### **КЛЮЧОВІ ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ТА МЕХАНІЗМИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗЕЛЕНОГО ПІДПРИЄМНИЦТВА ЯК ОСНОВИ ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ**

Як відомо, сьогодні розвиток економіки супроводжується посиленням екологічних викликів, які проявляються, насамперед, у зростанні дефіциту природних ресурсів, зміні кліматичних умов, забрудненні довкілля та втраті біорізноманіття. Відповідно, поглиблення цих процесів актуалізує потребу у формуванні нових підходів до економічного розвитку, зокрема переходу до збалансованих моделей господарювання, які забезпечують не лише зростання виробництва, а й збереження природного середовища для майбутніх поколінь. У цих умовах особливого значення набуває зелене підприємництво, яке розглядається як діяльність, що поєднує економічну ефективність із екологічною відповідальністю та соціальною орієнтацією, формуючи нову парадигму підприємницької діяльності, спрямовану на довгострокову стійкість економічних систем та гармонізацію взаємодії між економікою і довкіллям [1, с. 423-424].

У загальному вигляді зелене підприємництво передбачає здійснення підприємницької діяльності з урахуванням екологічних обмежень, принципів раціонального використання природних ресурсів, мінімізації негативного впливу на довкілля та впровадження екологічно безпечних технологій. Його сутність полягає у створенні економічної цінності з одночасним зменшенням екологічного впливу господарської діяльності, що стає фактором розвитку нових ринків, формування інноваційних виробничих моделей та оптимізації використання природних ресурсів [2, с. 172].

У цьому контексті важливим є переосмислення традиційних моделей виробництва та споживання, які базуються на лінійній економіці, та поступовий перехід до циркулярної моделі, що орієнтується на повторне використання ресурсів, мінімізацію відходів, переробку матеріалів і подовження життєвого циклу продукції [3, с. 184].

Такий підхід змінює класичні уявлення про підприємницьку діяльність, оскільки формує нові принципи створення доданої вартості, де екологічний фактор стає рівноправним елементом поряд з економічною ефективністю. У результаті підприємництво поступово трансформується у більш відповідальну систему економічних відносин, у якій враховуються не лише фінансові результати, а й вплив на навколишнє середовище та суспільство в цілому.

Важливу роль у розвитку зеленого підприємництва відіграють інноваційні підходи, які виступають рушійною силою його трансформації. Серед них ключове місце займають екологічні та технологічні інновації, що спрямовані на зменшення ресурсомісткості виробництва, скорочення енергоспоживання, зниження обсягів викидів шкідливих речовин та підвищення загальної ефективності використання сировинних ресурсів. Особливого значення набуває впровадження відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, гідроенергія, геотермальна енергія та енергія біомаси, які дозволяють зменшити залежність від традиційних енергоносіїв та сприяють декарбонізації економіки – переходу до низьковуглецевої або безвуглецевої моделі господарювання, спрямованої на вагоме скорочення викидів парникових газів, насамперед діоксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>), в атмосферу [4-5].

Окремим важливим інноваційним напрямом у зеленому підприємстві є цифровізація господарських процесів, яка забезпечує більш точне планування, моніторинг та контроль за використанням ресурсів. Завдяки цифровим технологіям підвищується прозорість діяльності, оптимізуються виробничі процеси та з'являються нові можливості для впровадження екологічних рішень на всіх етапах створення вартості. Це дозволяє підприємству ставати

більш адаптивним до сучасних викликів та швидше реагувати на зміни зовнішнього середовища.

Важливим аспектом є також формування нових екологічно орієнтованих моделей підприємницької діяльності, які базуються на інтеграції принципів сталого розвитку у всі етапи господарського процесу – від проєктування (планування) продукції до її утилізації. Це включає екологічне проєктування, оптимізацію логістичних систем, впровадження принципів відповідального споживання та розвиток систем управління відходами. У сукупності ці підходи сприяють формуванню нової культури підприємництва, яка орієнтується на довгострокову ефективність, екологічну безпеку та соціальну відповідальність.

Разом з тим, ефективна реалізація зеленого підприємництва потребує комплексного використання взаємопов'язаних механізмів, серед яких ключову роль відіграють економічні, інституційні та організаційні. Як відомо, економічні механізми передбачають створення системи стимулювання екологічно орієнтованих ініціатив, розвиток інвестицій у «зелені» проєкти, формування сприятливого фінансового середовища та використання інструментів підтримки раціонального ресурсокористування. Інституційні ж механізми охоплюють формування нормативно-правової бази, розробку стратегій сталого розвитку, удосконалення екологічного регулювання та інтеграцію екологічних стандартів у систему управління економікою. У свою чергу, організаційні механізми включають впровадження екологічних стандартів у практику підприємницької діяльності, розвиток систем сертифікації, а також формування екологічної культури та відповідальності серед суб'єктів господарювання.

Таким чином, зелене підприємництво виступає одним із ключових чинників сучасного сталого економічного розвитку, оскільки забезпечує баланс між економічним зростанням, соціальним добробутом та збереженням довкілля. Його розвиток ґрунтується на впровадженні інноваційних підходів та комплексних механізмів реалізації, що у сукупності сприяє формуванню екологічно збалансованої економічної системи. Така система є більш стійкою до зовнішніх викликів, здатною до адаптації в умовах глобальних змін та орієнтованою на довгостроковий розвиток.

1. Грінченко, Ю. (2026). «Зелене підприємництво» як фактор сталого розвитку. *Сталий розвиток – стан та перспективи* [Електронний ресурс]: V Міжнарод. наук. симп. (Львів-Славського, 21-24 січ. 2026 р.): зб. матеріалів. Електрон. текст. дані, 422-427.

2. Бабаєв, В., Дорошенко, Г., Димченко, О., Рудаченко, О., & Смачило В. (2025). Зелене підприємництво як інструмент сталого регіонального розвитку: досвід та перспективи Харківського регіону. *MODELING THE DEVELOPMENT OF THE ECONOMIC SYSTEMS*, 4, 170-178.

3. Череп, А., & Чепурна, Т. (2024). Циркулярна економіка як інструмент досягнення цілей сталого розвитку. *Актуальні проблеми економіки*, 12(282), 182-189.

4. Гнедіна, К., & Сорока, А. (2023). Декарбонізація економіки як чинник забезпечення кліматично нейтрального майбутнього: сучасні виклики і перспективи в Україні та світі. *Економіка та суспільство*, 54. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2804>

5. Кулініч, Т., Нагорний, В., & Рубан, О. (2025). Інноваційні підходи до сталого розвитку: екологічні стартапи та зелені технології. *Економіка та суспільство*, 72. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/5649>

## МІЖДЕРЖАВНІ УГОДИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЛОБАЛЬНОГО ПРОДОВОЛЬЧОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ: ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

У ХХІ столітті продовольча безпека набула глобального виміру, адже зростання чисельності населення, кліматичні зміни, воєнні конфлікти та дисбаланси у світовій економіці створюють комплексні виклики для забезпечення стабільного доступу до харчових ресурсів. У цих умовах міждержавні угоди й міжнародна співпраця виступають ключовими механізмами координації дій країн, спрямованих на збалансування світових продовольчих потоків, зниження ризиків дефіциту та досягнення Цілей сталого розвитку ООН. Ефективність таких угод визначається здатністю не лише врегульовувати торговельні аспекти, а й сприяти розвитку стійких продовольчих систем на основі солідарності, інновацій та рівноправного партнерства.

Важливим чинником є діяльність міжнародних організацій – **Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), Всесвітньої продовольчої програми (WFP), Світової організації торгівлі (WTO)**, які формують нормативно-правову базу та координують багатосторонні угоди у сфері продовольства. Розроблені ними механізми передбачають контроль за дотриманням стандартів безпечності продуктів, регулювання торгівлі аграрною продукцією, надання гуманітарної допомоги в кризових регіонах. Зокрема, програми WFP довели ефективність як інструмент оперативного реагування на надзвичайні ситуації, проте їх результативність значною мірою залежить від участі національних урядів і донорів.

Досвід регіональної співпраці свідчить, що угоди в межах **Європейського Союзу чи МЕРКОСУР** сприяють формуванню єдиного аграрного ринку, гармонізації стандартів та спільному фінансуванню аграрних програм [1]. У випадку ЄС реалізація **Спільної аграрної політики (САР)** стала дієвим механізмом забезпечення продовольчої стабільності, адже поєднує інструменти субсидування фермерів, підтримки інновацій та збереження екологічної рівноваги. Це підтверджує важливість довгострокових інтеграційних угод, які враховують багатовимірність продовольчого забезпечення – від економіки до екології та соціального розвитку.

Разом із тим, ефективність міждержавних угод значною мірою залежить від **балансу інтересів між країнами-експортерами та імпортерами продовольства**. Прикладом є домовленості в межах **СРТРП чи NAFTA/USMCA**, де аграрна продукція стала предметом складних переговорів через конкуренцію між національними виробниками. Ефективними виявляються угоди, які містять гнучкі механізми вирішення торговельних суперечок, а також стимулюють розвиток локальних продовольчих систем замість їх повної залежності від імпорту.

Особливе місце займають угоди, спрямовані на врегулювання кризових ситуацій. Прикладом стала **«зернова угода» між Україною, Туреччиною, ООН та Росією (2022–2023 рр.)**, яка продемонструвала здатність багатосторонньої дипломатії забезпечити стабільність світових ринків у період воєнної агресії та зменшити ризики голоду в найбільш уразливих країнах Африки та Азії [2]. Цей кейс підкреслив, що навіть у надзвичайних умовах міждержавні угоди можуть виступати ефективним інструментом глобального продовольчого менеджменту, якщо вони спираються на інтереси кількох сторін і мають міжнародні гарантії.

Водночас залишається низка обмежень, які знижують ефективність угод у сфері продовольчого забезпечення: **геополітична напруженість, недотримання зобов'язань, асиметрія у розподілі вигод, слабкість інституцій у країнах, що розвиваються**. Крім того, глобальна продовольча політика потребує глибшої інтеграції екологічних факторів, адже виснаження земельних і водних ресурсів, зміна клімату та викиди парникових газів дедалі більше впливають на стабільність аграрних ринків. Це вимагає включення екологічних стандартів і механізмів «зеленої угоди» у текст майбутніх міжнародних домовленостей.

Умови підвищення ефективності міждержавних угод у сфері продовольчого забезпечення передбачають:

- створення **глобальних механізмів моніторингу та контролю виконання домовленостей** із залученням незалежних інституцій;
- розвиток **гнучких моделей багаторівневого партнерства**, де поєднуються державні, приватні та громадські ініціативи;
- інтеграцію **цифрових технологій** (блокчейн, супутниковий моніторинг, big data) для відстеження переміщення продукції, прозорості торгівлі та запобігання спекуляціям;
- стимулювання **регіональної співпраці**, яка може швидше реагувати на локальні виклики продовольчої безпеки;
- обов'язкове врахування **екологічних та соціальних параметрів**, що забезпечує баланс між економічною вигодою й довгостроковою стійкістю.

Таким чином, міждержавні угоди у сфері глобального продовольчого забезпечення є не лише торговельно-економічними інструментами, а й важливим елементом глобального управління. Їхня ефективність визначається рівнем прозорості, гнучкості механізмів, балансом інтересів і готовністю до інтеграції інноваційних та екологічних стандартів. Для України, яка є одним із провідних експортерів агропродовольчої продукції, участь у таких угодах означає не лише зміцнення власної економіки, а й внесок у забезпечення світової продовольчої безпеки. Подальший розвиток міжнародного співробітництва у цій сфері може стати основою стабільності глобальної економіки та запорукою подолання продовольчих криз у майбутньому.

1. Вакарчук К. В. Співробітництво країн ЄС з меркосур та селак: регіональний та глобальний вимір. *Міжнародні та політичні дослідження*. 2022. №35. С. 145–156. <https://doi.org/10.18524/2707-5206.2022.35.261821>.

2. Медіакомпанія DW. Зернова угода - домовленість між ООН, Туреччиною, Україною і РФ про морські коридори для вивезення українського зерна, підписана 22 липня 2022 року. 17 липня 2023 року термін її дії збіг, РФ відмовилась від участі в ній. URL: <https://www.dw.com/uk/zernova-ugoda/t-65030117>.

**Барсуков Родіон, Коваленко Ангеліна, Скрипник Дмитро, Халін Ігор**  
*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна*

## **РОЗРОБКА RAG-СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ESG-ПОКАЗНИКІВ ТА ЕКОЛОГІЧНОСТІ ІНВЕСТИЦІЙНИХ АКТИВІВ**

За глобального курсу на екологізацію економіки (Green Deal) та сталий розвиток, інвестори дедалі частіше орієнтуються на ESG-критерії при виборі активів. Однак, масове явище «грінвошингу» (greenwashing) – створення хибного екологічного іміджу компаніями, що суттєво ускладнює виконати об'єктивну оцінку впливу дій корпорацій на довколишнє середовище. Типові фінансові платформи надають переважно лише кількісні показники, тоді як моніторинг екологічних ініціатив потребує глибинного аналізу серед текстових даних та новинного контексту.

Метою роботи є розробка прототипу інтелектуальної представницької сторінки за використання великих мовних моделей, що будуть спрямовані на автоматизацію збору та оцінки екологічної діяльності компаній на фондовому ринку.

Технічна архітектура програмного стеку реалізована з використанням Docker-контейнеризації, що забезпечує масштабованість системи для обробки великих масивів даних.

Клієнтська частина базується на фреймворку React, надаючи адаптивний інтерфейс для візуалізації екологічних рейтингів та динаміки котирувань акцій «зелених» підприємств (рис. 1). Дизайн системи є мінімалістичним, що дозволяє інвестору швидко побачити ключові ESG-метрики через інтерактивні графіки. Серверна логіка на Node.js забезпечує безперебійну інтеграцію з фінансовими базами даних та стабільну роботу кешуючих механізмів.

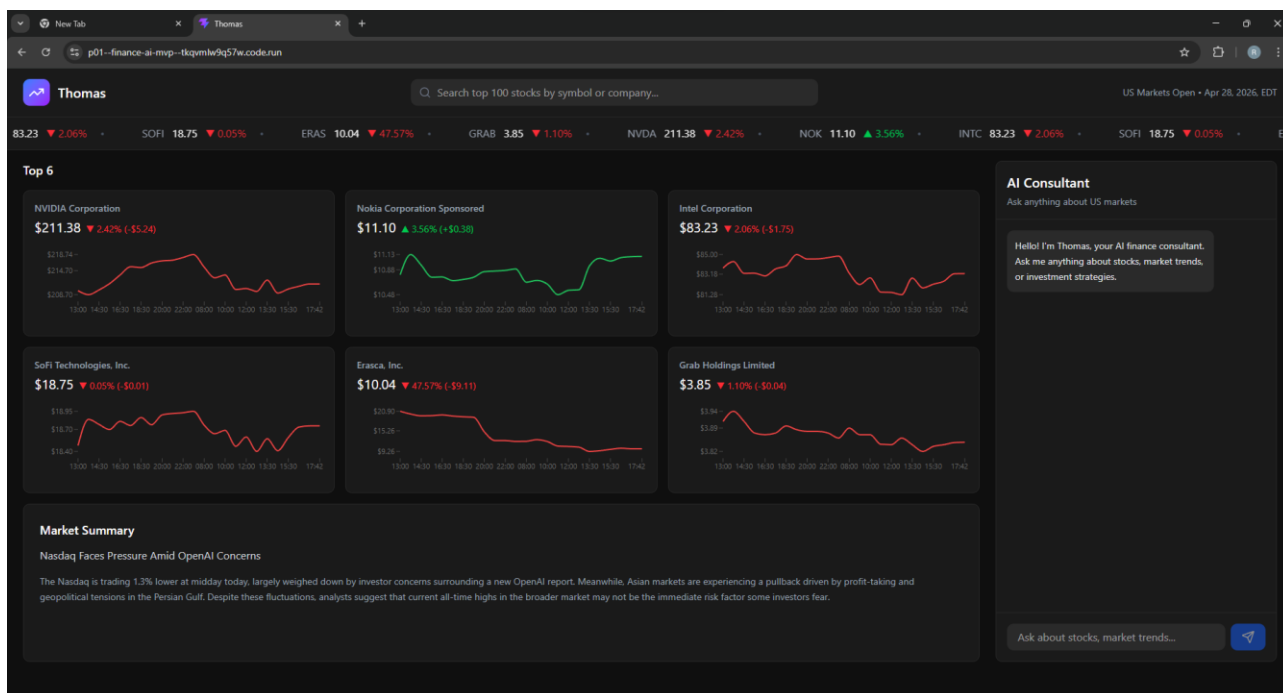


Рис. 1. Інтерфейс дашборду системи Finance AI з інтегрованим RAG-асистентом

Основною інновацією проекту є імплементація технології RAG (Retrieval-Augmented Generation) для семантичного аналізу екологічних звітів. Система використовує бібліотеку yahoofinance2 для швидкого знаходження актуальних новин про викиди CO<sub>2</sub>, екологічні санкції чи ініціативи щодо відновлюваної енергетики. Отриманий контекст аналізується мовною моделлю Gemini 3.1 Flash, яка формує висновки безпосередньо у вікні чат-асистента (рис. 2).

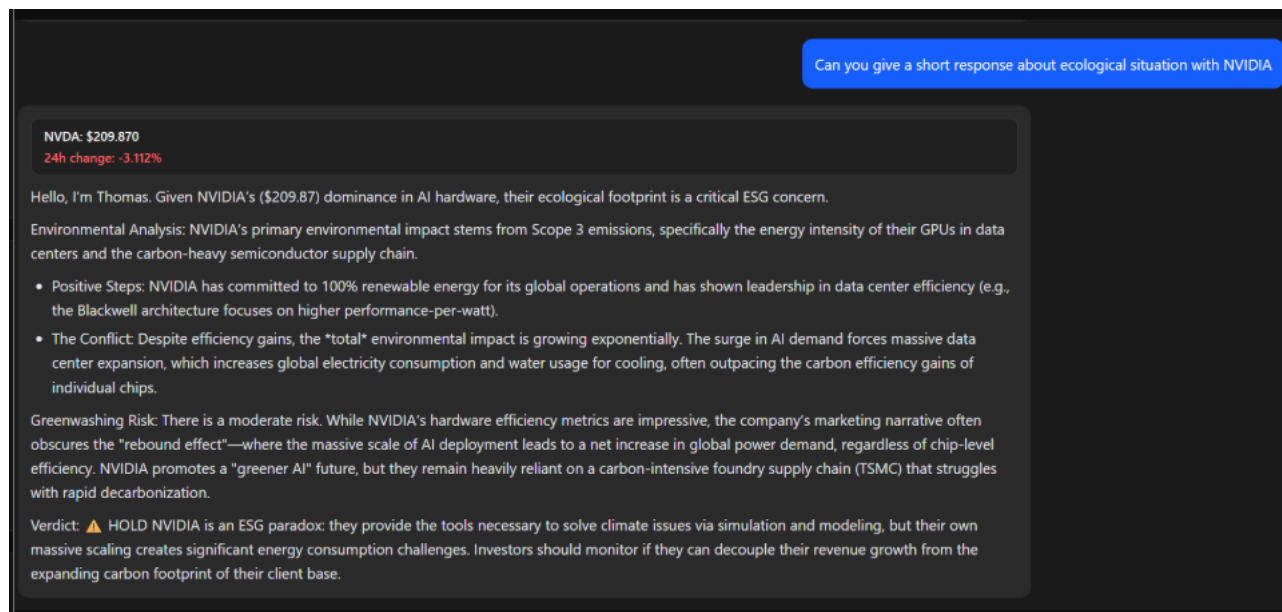


Рис. 2. Результат генерації аналітичного звіту щодо ESG-ризиків у чат-панелі

Практична апробація продемонструвала високу точність у виявленні «грінвошингу» завдяки оперуванню підтвердженими фактами, а не застарілими даними моделі, що були закладені під час розробки. Даний підхід сприяє переходу до прозорої екологічної економіки через впровадження новітніх нейромережових інструментів моніторингу.

1. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., ... & Kiela, D. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 33, 9459-9474.
2. Boffo, R., & Patalano, R. (2020). ESG investing: Practices, progress and challenges. *OECD Paris*.
3. Gao, Y., Xiong, Y., Gao, X., Jia, K., Pan, J., Bi, Y., ... & Wang, H. (2023). Retrieval-augmented generation for large language models: A survey. *arXiv preprint arXiv:2312.10997*.

**Hembarska Nataliia, Voloshyn Orysia**  
**Lviv Polytechnic National University**  
**Danylkiv Khrystyna**  
**Independent Bureau of Education Quality, Ukraine**  
**West College Scotland, United Kingdom**

### **“GREEN” FINANCIAL LITERACY AS A FACTOR IN THE GREENING OF THE ECONOMY: KEY TRENDS AND CHALLENGES**

The issue of the greening of the economy has become particularly relevant in the context of contemporary global transformations, as the international community faces a complex set of interconnected challenges. The combination of climate change, increasing anthropogenic pressure, and the necessity to fulfil international commitments within sustainable development strategies, particularly the European Green Deal [1], necessitates a profound restructuring of economic models and mechanisms for natural resource management. An additional catalyst for these processes is geopolitical instability, particularly the war in Ukraine, which has caused large-scale environmental destruction and economic losses while simultaneously establishing environmental modernisation as one of the key priorities for the country's post-war recovery.

The greening of the economy and the transition to “green” development models have been examined by a wide range of scholars both in Ukraine and internationally. The principal research contributions are concentrated within the fields of ecological economics, sustainable development, and physical economics. At the same time, the issue of “green” financial literacy is emerging at the intersection of ecological economics and classical finance, focusing on the analysis of how financial awareness influences the investment and consumption behaviour of economic actors in the context of the low-carbon transition.

Climate change is manifested through a persistent increase in average annual temperatures, a growing frequency of extreme weather events, and the degradation of natural ecosystems. These processes create substantial threats to economic stability and social well-being, significantly increasing the vulnerability of contemporary economic systems to climate-related risks that directly affect production activities, energy security, food systems, and infrastructure development [2].

At the same time, anthropogenic pressure continues to intensify. Industrial emissions, pollution of water and land resources, excessive exploitation of natural raw materials, and the inability of traditional technologies to ensure ecosystem regeneration further aggravate the environmental crisis, thereby reinforcing the need to implement principles of resource efficiency and innovative environmental solutions.

International initiatives exert a significant influence on the formation of environmental and economic policy, particularly the European Green Deal, which establishes the objective of achieving climate neutrality by 2050, promotes the active use of sustainable financial instruments, supports the development of non-financial reporting systems, and enhances the transparency of corporate environmental indicators. In this context, the greening of the economy emerges as a profound transformation of the economic system aimed at aligning economic growth with environmental preservation.

A key factor in implementing such a transformation is green financial literacy, which is developing as a comprehensive set of knowledge, skills, and behavioural competencies that enable individuals, businesses, and public institutions to make financial decisions while taking into account their long-term environmental impact. It is increasingly acquiring the characteristics of an interdisciplinary category, combining the tools of ecological economics, sustainable finance, and behavioural finance, thereby extending beyond the traditional understanding of financial literacy. This includes the ability to analyse corporate ESG indicators, interpret non-financial reporting in accordance with the European Sustainability Reporting Standards (ESRS) [3] and the EU Taxonomy [4], as well as identify climate and environmental risks integrated into financial products. Such an approach makes it possible to consider green financial literacy as a system-forming factor in the greening of the economy, directly influencing the transformation of investment and consumer behaviour.

Empirical research shows that increasing the level of green financial literacy is a more effective tool for promoting environmentally responsible consumption than general financial education, and it requires targeted support from financial institutions and public policy [5]. Monitoring of its level in European Union countries is carried out by assessing public awareness of sustainable financial products, the ability to identify environmental risks, and the willingness to adjust financial behaviour in line with the EU's climate goals [2].

At the same time, the development of green financial literacy faces a number of objective challenges, including insufficient public awareness of sustainable financial instruments, the complexity of regulatory frameworks, the fragmentation of environmental and financial education, unequal access to reliable environmental information, and the spread of greenwashing practices [6]. The latter creates additional barriers to building trust in sustainable financial instruments and reduces the effectiveness of environmental policy. This highlights the need not only to disseminate knowledge but also to develop critical analytical skills for assessing corporate environmental claims and the reliability of ESG indicators.

Greenwashing, as a form of marketing manipulation, creates a misleading image of corporate environmental responsibility and diverts consumers' attention from real environmental actions. The use of vague statements, outdated data, false labels, or "green" visual elements undermines trust in sustainable financial products and complicates the development of critical thinking in the field of green financial literacy. This is particularly dangerous in situations where companies may manipulate their ESG performance indicators in order to attract investment without delivering genuine environmental impact.

In this context, the role of the state and financial regulators becomes particularly important, as the development of green financial literacy requires not only educational initiatives but also systematic institutional support. This involves creating a transparent regulatory environment, mandatory disclosure of environmental and climate-related information by companies, the coordinated implementation of ESG reporting standards, as well as the establishment of economic incentives for the development of green financial instruments. Such an approach helps reduce information asymmetry in financial markets, increase trust in sustainable investments, and promote more effective greening of the economy.

An important precondition for the effective development of green financial literacy is its inclusive nature. It should cover all social groups, regardless of income level, place of residence, or access to digital technologies. Otherwise, there is a risk of deepening socio-economic inequality in access to sustainable financial instruments, where the benefits of the green transition would be

concentrated among a limited group of economically active actors. Ensuring the inclusiveness of green financial literacy contributes to a fair and socially balanced green transition.

Practical implications of the development of green financial literacy are also significant for businesses and financial institutions, as they contribute to improving non-financial reporting, increasing the transparency of ESG indicators, and reducing the risks of greenwashing. In the context of Ukraine's post-war recovery, green financial literacy gains additional strategic importance, as it serves as a tool for attracting international financial resources to support economic reconstruction based on the "build back better" approach. Awareness of sustainable financial instruments and environmental reporting standards increases the country's investment attractiveness and facilitates the implementation of environmentally safe and energy-efficient recovery projects.

The synthesis of contemporary approaches allows the identification of key trends in the development of green financial literacy that directly influence the processes of economic greening:

1) Key trends in the development of green financial literacy:

- ✓ Integration of ESG criteria, reflected in the growing attention to environmental, social, and governance factors in investment decision-making.
- ✓ Promotion of green investing, including increasing demand for instruments that finance energy efficiency and renewable energy (e.g., green bonds, "green" deposits).
- ✓ Rationalisation of consumption and savings, through the development of skills for choosing goods and services with minimal environmental impact.
- ✓ Digitalisation of sustainable finance, implemented through the spread of fintech solutions for monitoring the carbon footprint of spending and investments.
- ✓ Development of green education, involving the integration of sustainable finance topics into educational programmes and national strategies.

2) Impact on the greening of the economy:

- ✓ Provision of "green" financing, whereby financially literate citizens and businesses are more likely to invest in projects that reduce pollution and support the restoration of natural resources.
- ✓ Formation of responsible business practices, as the growing demand for transparent environmental reporting encourages companies to adopt the principles of a green economy.
- ✓ Post-war recovery of Ukraine, where green financial literacy serves as a foundation for attracting investment in reconstruction based on environmental safety and energy independence principles.

According to the provisions of the National Financial Literacy Strategy until 2030 [7], the development of responsible financial behaviour is defined as a priority for ensuring long-term economic stability and environmental well-being. This confirms that green financial literacy is not only an educational objective but also a key factor in the systemic transformation of the economy in response to global climate challenges.

Therefore, green financial literacy emerges as a system-forming factor in the greening of the economy, as it determines the ability of the state, businesses, and citizens to transform financial decisions in line with sustainable development goals. It combines economic efficiency with environmental responsibility and ensures the reorientation of financial flows towards low-carbon, resource-efficient, and socially oriented economic models.

The analysis of key trends in the development of green financial literacy – the integration of ESG criteria, the promotion of green investment, the digitalisation of sustainable finance, the development of green education, and the formation of rational consumption behaviour – confirms its important role in strengthening the financial foundations of the ecological transition.

At the same time, the identified challenges, including the spread of greenwashing, the complexity of the regulatory environment, unequal access to sustainable financial instruments, and the need for institutional support from the state, highlight the necessity of a comprehensive approach to its development.

In the context of the implementation of the European Green Deal and the post-war reconstruction of Ukraine, green financial literacy gains strategic importance as a tool for attracting

international investment, ensuring the “build back better” principle, and fostering long-term economic and environmental resilience.

1. European Commission. (2019). *The European Green Deal* (COM(2019) 640 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>.
2. European Environment Agency. (2021). *Trends and projections in Europe 2021*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/trends-and-projections-in-europe-2021>.
3. European Commission. (2023). *Commission delegated regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards*. Official Journal of the European Union. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_del/2023/2772/oj](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj).
4. European Parliament & Council of the European Union. (2020). *Regulation (EU) 2020/852 of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment*. Official Journal of the European Union, L 198, 13–43. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj>.
5. Yao, X. (2022). *Green financial literacy and low-carbon consumption* (SSRN Working Paper No. 4235353). <https://ssrn.com/abstract=4235353>.
6. Delmas, M. A., & Burbano, V. C. (2011). The drivers of greenwashing. *California Management Review*, 54(1), 64–87. <https://doi.org/10.1525/cmr.2011.54.1.64>.
7. National Bank of Ukraine. (2024). *National Strategy for Financial Literacy Development until 2030*. <https://bank.gov.ua/ua/about/strategy-fin-literacy>.

**Гембарська Наталія**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**

## **РОЛЬ БУХГАЛТЕРА В УМОВАХ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ**

Системні кліматичні загрози та поглиблення екологічної кризи зумовлюють структурні зрушення у світовій економіці, спрямовані на формування моделі «зеленого» зростання. У центрі цієї трансформації перебуває поєднання економічного розвитку з екологічною безпекою та соціальною відповідальністю, що призводить до зміни підходів до державного регулювання, корпоративного управління та інформаційного забезпечення господарської діяльності. Впровадження низьковуглецевих стратегій, розвиток відновлюваної енергетики й поширення принципів циркулярної економіки формують нову парадигму конкурентоспроможності, у межах якої екологічні інновації стають вирішальним чинником довгострокового економічного успіху.

Актуальність дослідження ролі бухгалтера в умовах екологізації економіки Європейського Союзу для України суттєво зросла в контексті повномасштабної війни, повоєнного відновлення та прискореної євроінтеграції. Курс України на наближення до права та економічних стандартів ЄС, зокрема у сфері сталого розвитку, «зеленого» переходу та корпоративної звітності, зумовлює необхідність адаптації національних інституцій, бізнесу й професійної спільноти до нової регуляторної реальності. Очікуване залучення значних обсягів європейського фінансування для відбудови інфраструктури, енергетики та промисловості передбачає виконання вимог щодо ESG-звітності, прозорості використання коштів та оцінювання кліматичних ризиків, що безпосередньо посилює роль бухгалтера як ключового носія достовірної фінансової й нефінансової інформації. У цих умовах бухгалтер стає важливим учасником не лише корпоративного управління, а й ширшого процесу екологізації економіки, цифровізації звітності та інтеграції України у простір «зеленого» майбутнього Європейського

Союзу, що надає темі особливої наукової та практичної значущості в сучасних умовах.

Європейський Союз посідає провідні позиції у формуванні інституційних засад екологізації економіки. Європейський зелений курс визначає стратегічний вектор розвитку ЄС як кліматично нейтрального простору, передбачаючи досягнення нульового рівня чистих викидів парникових газів до 2050 року. Реалізація цієї стратегії ґрунтується на комплексній модернізації промисловості, фінансового сектору та системи корпоративного управління, водночас забезпечуючи принципи соціальної справедливості та справедливого переходу для регіонів і галузей із різним рівнем економічного розвитку.

Становлення зеленої економіки в Європейському Союзі супроводжується переосмисленням ролі інформації в управлінні та прийнятті економічних рішень. Екологічна відповідальність, сталість бізнес моделей і соціальні зобов'язання переходять зі сфери добровільних ініціатив у площину обов'язкових регуляторних вимог. У цьому контексті корпоративна звітність набуває ключового значення як інструмент прозорості, підзвітності та контролю за досягненням цілей сталого розвитку, а обліково аналітичні системи стають важливою складовою екологічної політики.

Формування єдиної архітектури звітності про сталий розвиток у Європейському Союзі відбувається на основі трьох взаємопов'язаних нормативних механізмів:

- Директива щодо корпоративної звітності зі сталого розвитку (Corporate Sustainability Reporting Directive, CSRD) закладає правову основу нової моделі корпоративної звітності, інтегруючи фінансові та нефінансові аспекти діяльності в єдину інформаційну систему [1];

- Регламент ЄС про таксономію сталих видів економічної діяльності (EU Taxonomy) формує науково обґрунтовану класифікацію екологічно стійких видів економічної діяльності та встановлює вимоги до розкриття частки «зелених» доходів, інвестицій і витрат [2];

- Європейські стандарти звітності зі сталого розвитку (European Sustainability Reporting Standards, ESRS) деталізують зміст, структуру та показники ESG інформації, забезпечуючи її порівнюваність, повноту та можливість незалежної перевірки [3].

Запровадження цих регуляторних інструментів істотно трансформувє професійну роль бухгалтера. Традиційна модель, в якій бухгалтер виконував здебільшого функції фінансового обліку та звітності, поступається місцем багатофункціональній ролі аналітика сталого розвитку. У межах вимог CSRD бухгалтер стає ключовим учасником інтеграції ESG факторів у систему управлінських рішень, забезпечуючи оцінювання фінансових і нефінансових ризиків, можливостей та стратегічних наслідків для бізнесу.

Нові регуляторні вимоги вимагають від бухгалтера глибшого розуміння бізнес моделі підприємства, його ланцюгів створення вартості, екологічних процесів і соціального впливу. Застосування принципу подвійної суттєвості, закріпленого у CSRD та ESRS, передбачає одночасну оцінку впливу діяльності компанії на довкілля й суспільство та фінансових ризиків, що виникають унаслідок кліматичних і соціальних змін. Це суттєво розширює аналітичну складову бухгалтерської діяльності та підвищує її стратегічну значущість у системі корпоративного управління.

Важливою рисою нового підходу є поглиблена інтеграція фінансової та нефінансової інформації. Звітність про стійкість повинна відповідати таким самим вимогам точності, повноти й аудитоспроможності, що й фінансова звітність. У цьому контексті бухгалтер відповідає за побудову внутрішніх систем контролю даних, які забезпечують узгодженість ESG показників, їх відповідність стандартам ESRS та вимогам EU Taxonomy. Особливого значення набуває поєднання фінансових результатів діяльності з екологічними характеристиками та показниками ресурсної ефективності.

Регуляторні зміни також суттєво розширюють сфери відповідальності бухгалтера, зокрема у частині розкриття інформації про викиди парникових газів. Стандарти ESRS передбачають облік і звітування щодо викидів парникових газів за сферами Scope 1 (прямі викиди), Scope 2 (непрямі викиди від споживаної енергії) та Scope 3 (інші непрямі викиди у ланцюгах постачання), що вимагає координації збору даних по всій ланці створення вартості та тісної взаємодії з екологами, логістами й контрагентами. Крім того, бухгалтер бере участь в

оцінюванні кліматичних ризиків для бізнес моделі та фінансових результатів, а також у документуванні управлінських заходів з адаптації до зміни клімату та зменшення негативного впливу на довкілля.

Суттєво зростає значення управління ланцюгами постачання. Сучасні вимоги ESG звітності охоплюють розкриття інформації щодо соціальних і екологічних стандартів у взаємодії з постачальниками, дотримання прав людини, норм охорони праці та екологічної безпеки. У цьому процесі бухгалтер виконує координаційну функцію, забезпечуючи збір, узагальнення та верифікацію даних, необхідних для формування цілісної та достовірної картини впливу діяльності компанії.

Цифровізація є невід'ємним елементом сучасної моделі звітності про сталий розвиток та важливим інструментом екологізації економіки Європейського Союзу. Запровадження вимог CSRD, ESRS та EU Taxonomy істотно ускладнює процеси збору й обробки нефінансової інформації, що фактично унеможливує використання ручних методів обліку екологічних показників. Особливо це стосується обліку викидів парникових газів, для якого необхідно забезпечити повноту, простежуваність і відтворюваність даних за всіма рівнями - Score 1, Score 2 та Score 3, включно з ланцюгами постачання.

У цих умовах автоматизація обліку викидів набуває визначального значення. Використання автоматизованих систем екологічного моніторингу та цифрових інструментів вимірювання споживання енергії, транспортних операцій, утворення відходів і використання ресурсів забезпечує безперервний і стандартизований збір даних. Інтеграція внутрішніх облікових систем із зовнішніми платформами постачальників формує єдину інформаційну базу для звітності відповідно до стандарту ESRS E1 «Climate change» - стандарту кліматичної звітності в межах Європейських стандартів звітності зі сталого розвитку [3] і технічних критеріїв EU Taxonomy [2], зменшуючи ризик похибок, пришвидшуючи підготовку звітності та підвищуючи її аудиторспроможність.

Подальший розвиток бухгалтерської функції пов'язаний із застосуванням технологій Big Data (аналітики великих обсягів структурованих і неструктурованих даних), що зумовлено вимогами CSRD щодо повноти та порівнюваності звітності по всій ланці створення вартості. Для бухгалтера це означає перехід до комплексної аналітики ESG-даних, спрямованої на оцінювання екологічних ризиків і можливостей, аналіз впливів у ланцюгах постачання та формування системи показників ефективності на основі орієнтованих на дані підходів. Зростання обсягів і складності нефінансової інформації також актуалізує використання інструментів штучного інтелекту у верифікації екологічних даних, зокрема для автоматичної перевірки їхньої узгодженості, виявлення аномалій та зіставлення з критеріями EU Taxonomy, що сприяє підвищенню якості аудиту та довіри інвесторів і регуляторів.

Таким чином, цифрові технології формують цілісну інфраструктуру нової бухгалтерської професії в умовах екологізації економіки Європейського Союзу. Поєднання нормативних вимог, автоматизованих облікових систем, аналітики великих даних і інструментів штучного інтелекту зумовлює фундаментальну зміну парадигми бухгалтерського обліку та визначає його ключову роль у формуванні сталого розвитку й зеленого майбутнього ЄС.

Водночас, трансформація ролі бухгалтера супроводжується низкою викликів, серед яких недостатній рівень підготовки кадрів у сфері ESG та цифрової звітності, значні витрати на навчання персоналу й впровадження інформаційних систем, складність збору нефінансових даних у глобальних ланцюгах постачання. Проте, зазначені виклики водночас стимулюють професійний розвиток і формування нових спеціалізацій, зокрема:

- sustainability accountant (бухгалтер зі сталого розвитку);
- carbon accountant (фахівець з обліку вуглецевих викидів);
- ESG аналітик.

У цьому контексті важливими стають додаткові зв'язки, що формують нову архітектуру професійної діяльності бухгалтера: взаємодія з керівництвом - стратегічне планування; взаємодія з постачальниками - управління ланцюгом вартості; взаємодія з аудиторами -

забезпечення достовірності ESG-даних.

Отже, екологізація економіки Європейського Союзу зумовлює глибокі інституційні та професійні трансформації в системі корпоративного управління. Запровадження CSRD [1], EU Taxonomy [2] та ESRS [3] надає бухгалтерській професії стратегічного значення у формуванні сталого розвитку бізнесу. Завдяки поєднанню професійних компетентностей і сучасних інформаційних технологій бухгалтер стає ключовою фігурою у забезпеченні достовірності, прозорості та аналітичної цінності даних, що лежать в основі екологічно та соціально відповідальних управлінських рішень і формування зеленого майбутнього країн Європейського Союзу.

1. European Parliament and the Council of the European Union. (2022). *Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting..* Official Journal of the European Union, L 322, 15–80. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng>.

2. European Parliament and Council of the European Union. (2020). *Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment.* Official Journal of the European Union, L 198, 13–43. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/eng>.

3. European Commission. (2023). *Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards.* Official Journal of the European Union. [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_del/2023/2772/oj/eng](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj/eng).

Євтух Любов

*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ТРАНСФОРМАЦІЯ ФІНАНСОВОЇ ЕКОСИСТЕМИ УКРАЇНИ НА ЗАСАДАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

В наш час на розвиток фінансової екосистеми значно впливає необхідність протистояти військовим ризикам в умовах повномасштабної війни. Це обмежує надавачів фінансових послуг, вимагає створення додаткових запобіжних заходів. Попри те, українська економіка, фінансові установи враховують світові тенденції та незважаючи на непрості умови функціонування трансформують свої бізнес-процеси в напрямку впровадження принципів сталого розвитку. Метою даного дослідження є виявлення характеру змін фінансової екосистеми та її подальшого удосконалення на засадах сталого розвитку.

Можна виокремити два вектори впливу екологізації на суспільні відносини. Перший призвів до ширшого застосування в теорії та практиці аналізу економічних закономірностей біологічних термінів, зокрема «екосистема», що зазвичай трактується як сукупність живих організмів, які адаптувалися до спільного життя в певному середовищі, утворюючи з ним єдине ціле. Останніми десятиліттями виникли такі поняття, окремі наукові категорії як: «фінансова екосистема», «банківська екосистема», «екосистема криптовалют», «екосистема

fintech», «екосистема фінансових послуг», «екосистема цифрових гарантів», «фінансова екосистема підприємництва», «екосистема фінансового менеджменту» та ін. [1]. Фінансову екосистему в цьому контексті зазвичай розглядають як сукупність надавачів фінансових послуг, інфраструктурних учасників та розробників технологій, органів державної влади і управління, експертів, що взаємодіють між собою на умовах співробітництва та конкуренції з метою створення та надання фінансових продуктів і послуг клієнтам. Як зазначають Т. Озарків та П. Гориславець, використання терміна «фінансова екосистема» підкреслює, що фінансовий сектор не обмежується традиційними банками та фінансовими установами, а є глобальним, об'єднує різноманітних учасників та технології, які «взаємодіють між собою для надання фінансових послуг та розвитку інновацій»[2].

Другий вектор впливу екологізації пов'язаний з усвідомленням суспільством відповідальності за майбутнє: необхідністю запобігання кліматичним змінам, забрудненню повітря та води; слід забезпечувати раціональне використання природних ресурсів, зменшувати викиди парникових газів. Ухвалені у зв'язку з цим ООН Цілі сталого розвитку у 2015 р. стали орієнтиром для наступних дій суб'єктів господарювання, громадських організацій та країн загалом для більш безпечного довкілля та умов життєдіяльності.

Важливу роль у трансформаціях фінансової екосистеми України відіграють регулятори ринку: Національний банк України (НБУ) та Національна комісія з цінних паперів та фондового ринку (НКЦПФР), які через нормативні документи спонукають фінансово-кредитні установи діяти на засадах сталого розвитку, переспрямовувати фінансові ресурси в зелену економіку. Ще до повномасштабного вторгнення НКЦПФР розробила «Рекомендації щодо реалізації або фінансування проектів екологічного спрямування шляхом емісії зелених облігацій» [3] та «Додаток з питань корпоративного управління і сталого розвитку до Кодексу корпоративного управління (Додаток з питань ESG)» [4], які базуються на методичних рекомендаціях провідних учасників ринку капіталів – Європейської комісії, Міжнародної асоціації ринків капіталу, Міжнародної фінансової корпорації та Світового банку. Це дозволяє фінансовим компаніям та іншим учасникам фондового ринку впроваджувати в практичну роботу світовий досвід ESG.

НБУ також впроваджує провідні міжнародні стандарти з сталого розвитку, що знайшло своє відображення у таких нормативних документах: «Політика з розвитку сталого фінансування» [5] (вересень 2024 р.); «Біла книга з управління екологічними, соціальними та управлінськими (ESG) ризиками у фінансовому секторі» [6] (червень 2025 р.); «Зміни до Методичних рекомендацій щодо організації корпоративного управління в банках України» [7] (лютий 2026 р.). Якщо Біла книга є дороговказом щодо ESG-ризиків, то Методичні рекомендації [7] доповнено новим розділом «Сталий розвиток банку»; передбачено розробку банками Стратегії сталого розвитку банку у вигляді самостійного документу або ж як складової стратегії банку. Відповідно, банки зобов'язуються разом з наданням банківських та інших фінансових послуг здійснювати діяльність щодо організації власної діяльності та вивчення і спрямування клієнтів та партнерів на засадах сталого розвитку. Це має певні переваги і недоліки. Так, перевагами є дотримання європейських стандартів; підвищується імідж банку; екологічно скеровані клієнти ведуть бізнес більш відповідально; часто саме за рахунок екологічних проектів впроваджуються енергоефективні програми, що важливо в умовах обмежених ресурсів та подорожчання енергоносіїв. Недоліки в основному пов'язані з додатковими витратами банку на організацію первинної верифікації клієнтів та партнерів на відповідність типовому ESG-профілю, на збір даних та їх нагромадження для формування звітності та прийняття управлінських рішень. Окремі банки, які позиціонують себе як екологічно орієнтовані, враховують екологічні та соціальні ризики у своїй діяльності та складають звіти по сталому розвитку ще з 2018 р., серед них АБ «УКРГАЗБАНК», Банк Львів. Деякі банки виокремлюють окремий розділ «Сталий розвиток» в Річному звіті.

Дотримання засад сталого розвитку економіки потребує модернізації обладнання підприємств для впровадження безпечних для довкілля технологій, скорочення шкідливих викидів. На сьогодні існує кілька Урядових програм, що через грантове фінансування або пільгове кредитування дозволяють впроваджувати енергоефективні проекти. Банки беруть

активну участь у цих процесах взаємодіючи як з міжнародними організаціями, так і державними установами, такими як Фонд енергоефективності, Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, Національна установа розвитку та ін.

Отже, в умовах війни фінансова екосистема України виконує функції забезпечення фінансовими продуктами та послугами клієнтів, споживачів на належному рівні з врахуванням потреб зеленої економіки. Надавачі фінансових послуг під впливом світових тенденцій та внутрішніх нормативних документів впроваджують принципи сталого розвитку та спонукають до цього своїх клієнтів, що дозволяє їм впливати на економіку, забезпечувати економічне зростання без шкідливого впливу на довкілля.

1. Євтух, Л. (2024). Теоретичні основи функціонування фінансової екосистеми України. *Економіка та суспільство*, 68. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-138> (дата звернення: 11.04.2026)

2. Озарків, Т., & Гориславець, П. (2025). Розвиток аналітичного забезпечення фінансової екосистеми. *Ефективна економіка*, 3. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek\\_2025\\_3\\_65](http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2025_3_65) (дата звернення: 11.04.2026)

3. Рекомендації щодо реалізації або фінансування проєктів екологічного спрямування шляхом емісії зелених облігацій. *НКЦПФР*. URL: <https://www.nssmc.gov.ua/document/?id=12504480> (дата звернення: 15.04.2026)

4. Додаток з питань корпоративного управління і сталого розвитку (ESG) до Кодексу корпоративного управління. 02.12.2021. *НКЦПФР*. URL: <https://www.nssmc.gov.ua/document/?id=31282119> (дата звернення: 15.04.2026)

5. Політика з розвитку сталого фінансування. *НБУ*. 17.09.2024р. URL: <https://bank.gov.ua/ua/news/all/politika-natsionalnogo-banku-ukrayini-schodo-rozvitku-stalogo-finansuvannya-na-period-do-2025-roku> (дата звернення: 22.04.2026)

6. Біла книга з управління екологічними, соціальними та управлінськими (ESG) ризиками у фінансовому секторі. *НБУ*. URL: <https://bank.gov.ua/ua/news/all/bila-kniga-z-upravlinnya-ekologichnimi-sotsialnimi-ta-upravlinskimi-esg-rizikami-u-finansovomu-sektori> (дата звернення: 22.04.2026)

7. Зміни до Методичних рекомендацій щодо організації корпоративного управління в банках України: Рішення Правління НБУ 03 лютого 2026 р. № 31-рш. URL: [https://bank.gov.ua/ua/legislation/Decision\\_03022026\\_31-rsh](https://bank.gov.ua/ua/legislation/Decision_03022026_31-rsh). (дата звернення: 21.04.2026)

**Коваленко Ольга, Демчина Роман, Маєвська Оксана**  
**Національний лісотехнічний університет України**

## **АНАЛІЗ ЗАБРУДНЕНЬ У СТИЧНИХ ВОДАХ, ЩО УТВОРЮЮТЬСЯ НА АВТОМІЙНИХ СТАНЦІЯХ САМООБСЛУГОВУВАННЯ, ТА МОЖЛИВОСТІ ЇХНЬОГО ОЧИЩЕННЯ**

Зростання в Україні кількості автотранспорту протягом останнього десятиріччя (станом на початок 2026 року в активній експлуатації перебуває приблизно 10 млн. легкових автомобілів) сприяло активному розвитку транспортної інфраструктури. До неї належать і автотранспортні станції самообслуговування, масова поява яких насамперед визначається економічною доцільністю, адже процедура миття тут зручна як з погляду доступності, так і самої технології, що є швидкою та недорогою [1]. Специфіка роботи таких об'єктів полягає у використанні значних об'ємів води та різноманітних мийних засобів, що призводить до

формування складних за складом стічних вод, які містять синтетичні поверхнево-активні речовини (СПАР), нафтопродукти, фосфати та значну кількість завислих речовин [2].

Більшість таких станцій скидають стічні води в системи централізованого водовідведення без попереднього очищення, створюючи значне додаткове навантаження на муніципальні очисні споруди. В Україні наразі відсутня практика локального очищення стічних вод автомийок і бракує нормативних документів, які б чітко регламентували процедуру управління такими стоками. Після миття автотранспорту вода потрапляє у дренажні системи та колодязі-відстійники, де після нетривалого відстоювання (до 2 годин) скидається у каналізаційну мережу.

**Коротка характеристика аналізу забруднень у стічних водах автомийних станцій самообслуговування.** На початковому етапі дослідження здійснювалося оцінювання проб щодо вмісту в них завислих речовин та мікроскопічний аналіз частинок, осаджених унаслідок фільтрування. У відібраних пробах проводили лабораторне визначення (якісне та кількісне) таких забруднювальних речовин, як СПАР і фосфати. Попередньо проведений якісний аналіз із використанням тест-систем встановив наявність у стічних водах фосфатів та аніоногенних поверхнево-активних речовин (аПАР), тоді як неіоногенні та катіонні ПАР не виявлялися. Кількісне оцінювання фосфатів проводили фотометрично з використанням молібдату амонію, а аніоногенних ПАР – екстракційно-фотометричним методом із застосуванням метиленового синього. Отримані концентрації порівнювали з відповідними гранично допустимими концентраціями (ГДК).

#### **Аналіз результатів дослідження.**

Результати проведених досліджень дали змогу встановити, що стічні води автомийок мають нестабільний характер за концентраціями забруднювальних речовин, що залежить від інтенсивності експлуатації станції та типів мийних засобів. Короткочасне перебування стічних вод у колодязях-відстійниках не забезпечує повного осідання завислих частинок, особливо дрібнодисперсних. Щодо якісного складу, то переважали частинки глини, піску та волокон різного походження. В осаді наявні частинки різної форми (гострокутної, прямокутної, округлої), кольору (чорного, прозорого, сіруватого) та величини (більші, середні, маленькі).

Основними забруднювачами були аПАР, які входять до складу «активної піни» та автошампунів. Їхня концентрація у первинних стічних водах перевищувала встановлені норми у понад 40 разів [4]. Потрапляння аПАР до каналізаційних мереж спричиняє інтенсивне піноутворення. Ці сполуки негативно впливають на аеробне очищення стічних вод, пригнічуючи функціонування мікроорганізмів активного мулу. У проаналізованих пробах також зафіксовано підвищений вміст фосфатів, що є неприпустимим відповідно до чинних нормативів для мийних засобів [4].

Зважаючи на високі рівні аПАР та наявність залишків нафтопродуктів (пального, мастил), проведено оцінювання рівня хімічного споживання кисню (ХСК). Показник ХСК у стічних водах автомийних станцій самообслуговування є перевищеним (склав  $1000 \text{ мг/дм}^3$ ), тоді як діапазон значень, що встановлюють місцеві водоканали для стічних вод, які скидаються у системи центрального водовідведення коливаються в межах  $300\text{-}600 \text{ мг/дм}^3$ .

Для ефективнішого осадження завислих частинок різної дисперсності використано алюмовмісний коагулянт та флокулянт Magnafloc 1011 (комерційна назва 1011), які по чергово вносили до проб. Підбрано відповідні кількості сполук, що прискорювали осадження та оптимальні часові проміжки для досягнення повного освітлення аналізованих проб стічних вод автомийних станцій. Для зниження вмісту завислих речовин, концентрації аПАР та рівня ХСК проведено озонування відібраних проб. Встановлено, що використання цього методу дає змогу знизити концентрацію аПАР до рівня ГДК ( $0,41 \text{ мг/л}$  проти  $\text{ГДК}=0,5 \text{ мг/л}$ ), що усуває піноутворення. У пробах, що піддавали озонуванню спостерігалось зниження рівня ХСК приблизно в 5 разів, оскільки озон здатний ефективно забезпечувати деструкцію досліджуваних органічних компонентів, наявних у стічних водах автомийних станцій. Отримані результати свідчать, що застосування озонування як кінцевого етапу оброблення стічних вод перед їхнім скиданням у системи централізованого водовідведення може бути ефективним методом, що

забезпечує досягнення нормативних показників ГДК, усуває проблему надмірного піноутворення та значно знижує антропогенне навантаження на муніципальні системи біологічного очищення. Впровадження таких локальних комплексів дозволяє підприємствам не лише дотримуватися вимог щодо приймання стічних вод, а й створює технологічне підґрунтя для переходу до систем замкненого циклу водопостачання.

#### **Висновки.**

Стічні води автомийних станцій самообслуговування характеризуються надвисоким рівнем забруднення аніонними ПАВ (перевищення ГДК у понад 40 разів та органічними сполуками (ХСК до 1000 мг/дм<sup>3</sup>), що робить їхнє пряме скидання до міської каналізації екологічно небезпечним. Традиційне двогодинне відстоювання в колодязях-відстійниках є малоефективним методом, оскільки не забезпечує видалення дрібнодисперсних завислих часток та розчинених хімічних забруднювачів. Експериментально доведено високу ефективність комплексного методу очищення, що поєднує коагуляцію/флокуляцію (із використанням Magnafloc 1011) та фінальне озонування. Це дає змогу знизити концентрацію аПАВ до нормативних значень та зменшити показник ХСК у п'ятеро. Необхідним є впровадження систем локального очищення на кожній автомийній станції, що забезпечить дотримання Правил приймання стічних вод та створить умови для рециркуляції води (замкненого циклу), відповідно до принципів «зеленої» економіки та Водної стратегії України до 2050 року.

1. Винник Ю. Як відкрити мийку самообслуговування. Досвід розгортання мережі в Західному регіоні / WashService : бізнес-блог компанії. URL: <https://washservice.ua/informatsiia-pro-kompaniiu/> (дата звернення: 25.04.2026).

2. Обладнання для мийок самообслуговування. Історія компанії та етапи розвитку виробництва в Україні / Офіційний сайт компанії ICW. URL: <https://icw.ua/abouts> (дата звернення: 25.04.2026).

3. Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення : наказ М-ва регіон. розвитку, буд-ва та житл.-комун. госп-ва України від 01.12.2017 № 316. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18> (дата звернення: 25.04.2026).

4. Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем : постанова Кабінету Міністрів України від 13.06.2024 № 684. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-p> (дата звернення: 25.04.2026).

**Коцина Марта**  
*Краківський економічний університет*

### **ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ЕКОНОМІКИ ЯК СТРАТЕГІЧНИЙ ВЕКТОР ФОРМУВАННЯ «ЗЕЛЕНОГО» МАЙБУТНЬОГО ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ**

На зламі тисячоліть світова спільнота постала перед необхідністю переходу до нової ресурсоефективної моделі, де підвищення добробуту не супроводжується деградацією довкілля. Теоретичним фундаментом цього процесу стала концепція «екологічної економіки», яка, на відміну від традиційних моделей, розглядає економіку як частину вичерпної екосистеми планети. Важливим етапом еволюції цієї теорії стало впровадження поняття «планетарних меж» – критичних лімітів, порушення яких загрожує стабільності всієї біосфери.

Центральним інструментом реалізації цієї парадигми в Європі став «Європейський зелений курс», що спрямований на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Це вимагає докорінної перебудови економічних відносин: від лінійних моделей видобутку та споживання до систем циркулярної економіки, де ресурси максимально зберігають свою цінність через перепроєктування продукції та інноваційне управління ланцюгами постачання.

Екологічна трансформація неможлива без переорієнтації фінансових потоків. Концепція таксономії ЄС запроваджує чіткі критерії для екологічно стійких інвестицій, стимулюючи міграцію капіталу в чисті технології та відновлювану енергетику. Держава при цьому виступає не як єдине джерело коштів, а як каталізатор, що через механізми державно-приватного партнерства мінімізує ризики для приватних інвесторів. Важливу роль відіграє «подвійний перехід» – синергія екологізації та цифровізації, де технології штучного інтелекту та великих даних дозволяють оптимізувати використання ресурсів та моніторити стан довкілля в реальному часі.

Екологічна політика ЄС набуває глобального масштабу через реструктуризацію ланцюгів створення вартості. Впровадження Механізму коригування вуглецевих кордонів (СВАМ) забезпечує захист внутрішнього ринку від «витоку вуглецю» та водночас спонукає міжнародних партнерів до прийняття суворіших екологічних стандартів. Таким чином, ЄС формує нові норми корпоративної поведінки, де екологічна відповідальність стає невід'ємною частиною міжнародної конкурентоспроможності.

Трансформація економіки має значний вплив на ринок праці, що потребує адаптивної політики перекваліфікації кадрів та розвитку екологічної освіти. Крім економічної доцільності, процес екологізації має виразний етичний вимір, базуючись на принципах міжгенераційної справедливості – відповідальності перед майбутніми поколіннями за збереження екологічного капіталу планети.

Перехід до циркулярної економіки є фундаментальним зрушенням, що замінює лінійне споживання ресурсів замкненим циклом збереження їхньої цінності. На відміну від традиційного підходу, циркулярність передбачає перепроєктування продукції, ефективне управління ланцюгами постачання та розвиток бізнес-моделей оренди й переробки.

Особлива увага в контексті екологізації приділяється галузям із високим енергоспоживанням, де впроваджуються низьковуглецеві технології, а саме:

- Металургія та хімічна промисловість. У цих секторах відбувається активний перехід до використання водневих технологій для процесів виробництва, що дозволяє значно знизити викиди CO<sub>2</sub>.
- Уловлювання вуглецю. Впровадження систем уловлювання та зберігання вуглецю безпосередньо на виробничих потужностях стає стандартом для цементної та хімічної галузей.
- Ресурсоефективність. Промислова політика ЄС стимулює використання вторинної сировини, що зменшує залежність від імпорту та мінімізує обсяги промислових відходів.

Цифровізація визначена як один із головних чинників досягнення екологічних цілей через механізм так званого «подвійного переходу» (twin transition). Технологічний стек дозволяє не лише підвищити ефективність виробництва, а й забезпечити прозорість екологічного моніторингу.

Ключову роль у цифровізації відіграють наступні технології:

1. Інтернет речей (IoT). Мережі датчиків дозволяють у реальному часі відстежувати рівень викидів, споживання енергії та стан обладнання, що мінімізує втрати ресурсів.
2. Штучний інтелект (ШІ) та Великі дані (Big Data). Використовуються для оптимізації енергетичних мереж, інтелектуального управління транспортними потоками та прогнозування екологічних ризиків.
3. Системи прогнозування. Використання прогнозової аналітики дозволяє ідентифікувати довгострокові наслідки економічних рішень, переходячи від реактивної до превентивної екологічної політики.

Водночас екологічна трансформація вимагає уваги до стійкості самих цифрових технологій, зокрема зменшення енергоспоживання серверних центрів.

Отже, екологічна революція в ЄС є комплексною реконфігурацією всіх суспільних систем. Успіх цього процесу залежить від узгодженості промислової, фінансової та освітньої політик, що дозволяє поєднати економічний успіх із жорсткими екологічними обмеженнями сучасності.

1. UNEP. (2012). *Green economy in a blue world*. United Nations Environment Programme. <https://www.undp.org/publications/green-economy-blue-world>

2. European Green Deal: стратегічний перехід до кліматичної нейтральності. *Екодія*. <https://ecoaction.org.ua/ievropejskyj-zelenyj-kurs.html>

**Кудрик Роман**

*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ФОРМУВАННІ ІНВЕСТИЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД В УМОВАХ МІНЛИВОСТІ ЕКОНОМІКИ**

У сучасних умовах трансформації економічної системи України, посилення глобальної нестабільності, воєнних викликів та структурних змін у системі регіонального розвитку особливого значення набуває проблема формування інвестиційного потенціалу територіальних громад. Децентралізаційні процеси, зміна пріоритетів регіональної політики, необхідність повоєнного відновлення територій та зростання потреб у модернізації місцевої інфраструктури формують потребу у створенні нових механізмів забезпечення інвестиційної привабливості громад. У цих умовах інформаційні технології виступають одним із ключових інструментів підвищення ефективності управління інвестиційними процесами, забезпечення прозорості діяльності органів місцевого самоврядування та формування сучасної цифрової екосистеми територіального розвитку.

Особливого значення набуває цифровізація системи управління інвестиційною діяльністю територіальних громад. Використання інформаційно-комунікаційних технологій, цифрових платформ управління територіями, геоінформаційних систем та аналітичних сервісів дозволяє забезпечити комплексний моніторинг ресурсного потенціалу громад, оцінювання рівня інвестиційної привабливості територій та прогнозування перспектив соціально-економічного розвитку. У сучасних умовах цифрові технології створюють можливість інтеграції фінансових, інфраструктурних, екологічних та демографічних показників розвитку громад у єдину систему управлінської аналітики, що сприяє прийняттю ефективних стратегічних рішень.

Водночас інформаційні технології відіграють важливу роль у забезпеченні екологічної складової сталого розвитку територіальних громад. У сучасних умовах інвестиційна політика громад повинна враховувати не лише економічні показники ефективності, але й екологічні ризики та принципи сталого розвитку. Використання цифрових систем екологічного моніторингу, платформ контролю використання природних ресурсів, автоматизованих систем управління енергоспоживанням та технологій «розумного міста» дозволяє територіальним громадам забезпечити ефективне використання ресурсів, підвищити рівень енергоефективності та мінімізувати негативний вплив господарської діяльності на довкілля [1-2]. Особливого значення набуває впровадження цифрових технологій у систему управління відходами, транспортною інфраструктурою та комунальним господарством, що формує передумови для екологічно орієнтованого розвитку територій.

У системі формування інвестиційного потенціалу територіальних громад важливу роль відіграє розвиток цифрової інфраструктури та електронного врядування. Впровадження електронних платформ взаємодії з інвесторами, цифрових сервісів адміністративного

обслуговування, систем електронного документообігу та відкритих баз даних сприяє підвищенню прозорості діяльності органів місцевого самоврядування та зниженню рівня корупційних ризиків. Цифровізація управлінських процесів забезпечує скорочення часових витрат на реалізацію інвестиційних проєктів, підвищує рівень довіри інвесторів та створює сприятливі умови для розвитку партнерських відносин між громадою, бізнесом і державними інституціями.

Особливого значення в умовах мінливості економіки набуває використання інформаційних технологій у сфері ризик-менеджменту та стратегічного планування розвитку територіальних громад [3]. Високий рівень економічної невизначеності, фінансових ризиків, демографічних змін та екологічних загроз потребує впровадження сучасних цифрових інструментів прогнозування та аналізу ризикових ситуацій. Використання аналітичних платформ, систем моделювання соціально-економічних процесів та технологій штучного інтелекту дозволяє органам місцевого самоврядування оцінювати ефективність інвестиційних рішень, формувати адаптивні стратегії розвитку та забезпечувати стійкість територіальних громад до кризових явищ.

На рівні державної політики важливим завданням є формування інституційного середовища, яке сприятиме цифровій трансформації територіальних громад та розвитку їх інвестиційного потенціалу. Це передбачає розвиток цифрової інфраструктури, підтримку інноваційних технологій, удосконалення механізмів державного фінансування цифрових і екологічних проєктів, а також інтеграцію громад у національні та міжнародні цифрові платформи розвитку територій. Особливого значення набуває розвиток механізмів державно-приватного партнерства у сфері цифровізації управління громадами та реалізації інвестиційних проєктів, орієнтованих на принципи сталого розвитку.

У сучасних умовах одним із важливих чинників забезпечення ефективності інвестиційної діяльності територіальних громад є інформаційна безпека та надійність цифрової інфраструктури. Зростання рівня кіберзагроз, ризиків втрати даних та порушення функціонування цифрових сервісів потребує впровадження сучасних систем кіберзахисту, цифрової автентифікації та резервного збереження інформації. Надійність цифрової інфраструктури є важливою умовою забезпечення безперервності управлінських процесів та ефективної взаємодії між усіма суб'єктами інвестиційної діяльності.

Отже, інформаційні технології виступають важливим інструментом формування інвестиційного потенціалу територіальних громад в умовах мінливості економіки. Їх використання сприяє підвищенню ефективності управління інвестиційними процесами, забезпеченню екологічної безпеки, оптимізації використання ресурсів та формуванню сучасної моделі сталого розвитку територій. Інтеграція цифрових технологій у систему управління громадами створює передумови для підвищення інвестиційної привабливості територій, забезпечення їх конкурентоспроможності та формування стійкої системи соціально-економічного розвитку в умовах сучасних викликів.

1. Бугар, А. А. (2019). Роль інноваційного потенціалу країни у формуванні її міжнародного іміджу та інвестиційної привабливості. *Гілея: науковий вісник*, 144(3), 15-18

2. Кириченко, О. С. (2019). Планування державних цільових програм модернізації промисловості України в умовах переходу до технологій Четвертої промислової революції. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. Київ, 30 (69), 4, 45-49.

3. Нечипорук, О. В. (2020). Світовий досвід формування інвестиційної політики держави. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*, 4, 2, 343–348.

## **ФІНАНСОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ**

Забезпечення економічного зростання, належного рівня якості і безпеки людей можливе за умови стійкості енергетичної системи, яка в свою чергу є складовою концепції сталого розвитку. Сьогодні усі економічні сфери суттєво залежать від цінової політики на енергоресурси. Дефіцит енергетики та підвищення цін на енергоносії веде до зростання собівартості продукції, логістики та вартості послуг, провокує стрибок інфляції, що знижує купівельну спроможність населення і веде до економічної кризи.

Тривала і жорстока війна в Україні, політична та військова нестабільність ситуації в районі Ормузької протоки привели до чергової світової енергетичної кризи. Росія, яка багата на природні енергетичні ресурси, завжди використовувала їх як інструмент політичного впливу в різних країнах, а під час військової агресії в Україні цілеспрямовано знищує об'єкти енергетики, щоб якнайбільше зашкодити економіці нашої країни та українцям. Лише завдяки розвитку альтернативних джерел енергії, «зеленої» енергетики зокрема, Україна змогла пережити важку зиму 2025-2026 рр.

Енергетичні кризи, що приводять до подорожчання класичних видів палива, стають драйверами розвитку «зелених» виробництв. За попередні п'ятдесят років відбулося 15 енергетичних криз, зокрема в: 1973; 1979; 1980; 1990; 2000; 2004; 2005; 2007; 2008; 2009; 2021; 2022; 2023, 2025, 2026 рр. Останні кризи були зумовлені російсько-українською війною та військовим конфліктом на Близькому Сході [1].

Після енергетичної кризи у 1973 році Джон Фішер опублікував статтю «Енергетичні кризи в перспективі», в якій виділив два важливі аспекти державної політики у сфері енергетики:

- 1) фінансова політика в енергетиці;
- 2) зростання екологічно чистого виробництва енергії [2].

Світова фінансова криза 2008 року дала поштовх до створення нової економічної моделі розвитку, яка б дозволила вести бізнес без шкоди довкіллю і водночас забезпечила б добробут людей і планети. Таку модель назвали «зеленою економікою» та поклали в основу Концепції сталого розвитку, де виділено 17 Цілей сталого розвитку, серед яких Ціль 7 «Відновлювана енергія». Також з'явилося і поняття «зелених фінансів» - інструмента матеріальної підтримки проєктів, які сприяють розвитку зеленої економіки. Шляхом мобілізації капіталу та перерозподілу його на екологічні та соціально відповідальні проєкти фінансові установи приймають участь у відповідальному інвестуванні (ESG), а це означає, що при прийнятті інвестиційних рішень крім матеріальних показників враховуються екологічні (E – environmental), соціальні (S – social) й управлінські (G – governance) чинники. «Зелена економіка» – це економічна модель, спрямована на сталий розвиток, яка враховує екологічні обмеження [3].

Ще у 2016 році Україна, як і багато інших країн, взяла курс на розбудову зеленої економіки, ратифікувавши Паризьку кліматичну угоду, а у 2020-му уряд презентував концепцію «Зеленого енергетичного переходу України до 2050 року» [3].

Ключові напрями переходу:

- енергетика – збільшення частки відновлюваних джерел до 70 % в енергобалансі до 2050 року, підвищення енергоефективності, розвиток розподіленої генерації та «розумних» мереж;
- промисловість – модернізація й декарбонізація металургії, хімічної, цементної галузей, впровадження принципів циркулярної економіки;
- транспорт – електрифікація всіх видів засобів пересування, розвиток громадського електротранспорту, стимулювання використання «чистих» видів палива;
- сільське господарство – розвиток органічного землеробства, використання нетехнологічних добрив, інтеграція стандартів сталого управління природними ресурсами;
- будівництво – термомодернізація будівель, впровадження green-стандартів, використання низьковуглецевих матеріалів.

Реалізація Європейського зеленого курсу спрямована на екологізацію економіки та передбачає глибоку трансформацію енергетики, промисловості, транспорту, будівництва, сільського господарства і фінансової системи. Водночас фінансова система через банки, інвестиційні фонди, страхові компанії та інші інститути забезпечує перерозподіл фінансових ресурсів і визначає напрями інвестиційних потоків, виступаючи ключовим механізмом трансформації економіки та спрямовуючи фінансування на підтримку екологічно сталих видів діяльності.

У контексті технологічного забезпечення енергетичного переходу важливими є результати довгострокових досліджень у сфері «зеленої» енергетики. Зокрема, у звітах Массачусетського технологічного інституту узагальнено перспективні технології, які визначають напрями розвитку галузі: гарячі сонячні елементи (2017 р.), безвуглецевий природний газ (2018 р.), ядерна енергетика нового покоління та технології уловлювання вуглецю (2019 р.), рішення для адаптації до кліматичних змін (2020 р.), літій-металеві батареї та «зелений» водень (2021 р.), довговічні мережеві акумулятори і термоядерні реактори (2022 р.), а також технології переробки акумуляторів (2023 р.) [4].

Фінансування таких технологій матимуть пріоритетність у майбутньому, адже без енергозабезпечення неможливий економічний розвиток. Не менш важливо для економічних суб'єктів дотримуватись енергоощадності та енергоефективності. Після поточної кризи питання енергоефективності будуть ще більш актуальними.

Важливою є екологічна безпека, як складова національної безпеки. Українці особливо гостро це відчувають, коли дронів чи ракетні атаки російський агресор здійснює на територіях ядерних електростанцій, руйнуючи електропідстанції, нафтові контейнери та інше.

Фахівці Національного інституту стратегічних досліджень (НІСД) розробили математичну модель оцінювання рівня екологічної безпеки, яка вже апробована і показала свою ефективність. Розроблена система 40 індикаторів екологічної безпеки поділена на 7 груп: (I) Біорізноманіття та землекористування; (II) Забруднення повітря; (III) Адаптація до зміни клімату; (IV) Вплив енергетики, промисловості, транспорту на довкілля; (V) Довкілля та здоров'я населення; (VI) Поводження з відходами; (VII) Стан водних ресурсів. У Табл. 1 розкрито суть індикаторів четвертої групи.

Таблиця 1

#### Індикатори впливу енергетики, промисловості, транспорту на довкілля

| № | Індикатор                                                                                        | Вплив на довкілля                                                                | Ціль сталого розвитку            |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Рівень постачання енергії від відновлювальних джерел, % загального постачання первинної енергії  | збільшення показника є бажаним і загалом поліпшує загальну оцінку роботи об'єкта | Ціль 7 Доступна та чиста енергія |
| 2 | Частка викидів діоксиду вуглецю від загального постачання первинної енергії, тис. т/тис. т н. е. | зменшення показника є бажаним для поліпшення стану об'єкта                       | Ціль 7 Доступна та чиста енергія |

|   |                                                                                            |                                                                                  |                                                           |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 3 | Частка викидів діоксиду вуглецю у постачанні з відновлювальних джерел, тис. т/тис. т н. е. | зменшення показника є бажаним для поліпшення стану об'єкта                       | Ціль 7 Доступна та чиста енергія                          |
| 4 | Частка використання води на загальне постачання енергії, тис. куб. м/тис. т н. е.          | зменшення показника є бажаним для поліпшення стану об'єкта                       | Ціль 7 Доступна та чиста енергія                          |
| 5 | Енергомісткість ВВП, МДж/дол. ВВП за ПКС 2017                                              | зменшення показника є бажаним для поліпшення стану об'єкта                       | Ціль 7.3 Збільшення частки енергії з відновлюваних джерел |
| 6 | Рівень постачання первинної енергії, тис. т н. е./ос.                                      | збільшення показника є бажаним і загалом поліпшує загальну оцінку роботи об'єкта | Ціль 7.3 Збільшення частки енергії з відновлюваних джерел |

*Джерело: складено автором на основі [5]*

Представлені індикатори дозволяють кількісно оцінити вплив енергетики, промисловості та транспорту на довкілля, а також визначити рівень енергоефективності економіки. Зокрема, в індикаторах №2,3,4 використовуються скорочення одиниць вимірювання енергії (тис. т/тис. т н. е.) – тисячі тон нафтового еквівалента, який показує скільки енергії виділяється при згоранні 1000 тон сирої нафти. Індикатор №5 (енергоємність ВВП) - це витрати первинної енергії на одиницю ВВП, показник який розраховується як витрати первинної енергії (у мегаджоулях, МДж) на одиницю ВВП, розрахованого за паритетом купівельної спроможності (ПКС) у цінах 2017 року.

В Україні показник енергоємності України був дуже високим, але за останні 30 років він постійно знижується, наближаючись до стандартів енергоефективності.

Досягнення цільових значень цих індикаторів потребує не лише технологічних змін, але й належного фінансового забезпечення. У цьому контексті фінансування екологічних проектів в Україні здійснюється через: гранти, міжнародні інвестиції (NEFCO), державні цільові програми та «зелене» кредитування. Каталог «Зелена платформа» пропонує понад 100 програм для бізнесу та громад.

Держава через банки та спеціалізовані фонди пропонує такі інструменти фінансування:

- Програма «Доступні кредити 5-7-9%», яка передбачає також екологічну оцінку як умову для отримання пільгового фінансування;
- Екологічні фонди: цільові кошти, що формуються за рахунок екологічних податків для фінансування природоохоронних заходів на місцях;
- Зелені облігації: Інструмент залучення капіталу під конкретні екологічні проекти через фондовий ринок;

Для вирішення проблеми енергоефективності в країні створено спеціальний Фонд енергоефективності, який фінансується з Державного бюджету України за фінансової підтримки ЄС та уряду Німеччини. Фонд фінансово підтримує впровадження енергоефективних заходів об'єднання співвласників багатоквартирних будинків (ОСББ) та заходів із відновлення зруйнованих будинків [6].

На забезпечення екологізації економіки, створення альтернативних відновлюваних джерел енергії сьогодні в світі та в Україні спрямовані фінансові потоки, зокрема на:

- Енергоефективність (модернізація систем опалення, термо модернізація будівель).
- Відновлювану енергетику (сонячні, вітрові станції).
- Управління відходами (сортування, переробка, циркулярна економіка).
- Екомодернізацію виробництва (встановлення очисних споруд, зменшення викидів CO<sub>2</sub>).

Отже, забезпечення енергоефективності та екологізації економіки є ключовою передумовою сталого розвитку та економічної безпеки держави. Аналіз сучасних тенденцій свідчить, що досягнення цільових показників у цій сфері потребує комплексного поєднання технологічних інновацій, підвищення енергоефективності та ефективного фінансового забезпечення. Фінансова система відіграє визначальну роль у цьому процесі, спрямовуючи інвестиційні потоки на підтримку екологічно сталих видів діяльності. В Україні вже

сформовано базові інструменти фінансування «зеленої» трансформації, однак їх подальший розвиток і масштабування є необхідною умовою прискорення енергетичного переходу.

1. Войтко, С. В., & Гайдуцький, І. П. (2023). Енергетичні кризи та енергомісткість як складові міжнародного співробітництва. У *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Міжнародне науково-технічне співробітництво: принципи, механізми, ефективність»* (16–17 березня 2023 р.). Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». <https://istc-proc.kpi.ua/article/view/283618> (дата звернення 17.03.2026р)
2. Fisher, J. C. (1973). Energy crises in perspective. *Physics Today*, 26(12), 40. <https://doi.org/10.1063/1.3128361> (дата звернення 16.04.2026р)
3. WeAgro. (n.d.). Зелена економіка та зелені фінанси: що це та які перспективи для України. <https://weagro.ua/blog/zelena-ekonomika-ta-zeleni-finansy-shho-cze-ta-yaki-perspektyvy-dlya-ukrayiny> (дата звернення 7.03.2026р)
4. Massachusetts Institute of Technology. (2023). 10 breakthrough technologies 2023. <https://www.technologyreview.com/2023/01/09/1066394/10-breakthrough-technologies-2023> (дата звернення 8.04.2026р)
5. Іванюта, С. (2025). Про необхідність запровадження системи індикаторів екологічної безпеки України. Національний інститут стратегічних досліджень. [https://niss.gov.ua/sites/default/files/2025-06/az\\_indikatori\\_ekobezpeki\\_ukr\\_1606.pdf](https://niss.gov.ua/sites/default/files/2025-06/az_indikatori_ekobezpeki_ukr_1606.pdf) (дата звернення 4.04.2026р)
6. Фонд енергоефективності України. (n.d.). Про фонд. <https://eefund.org.ua/pro-fond> (дата звернення 27.03.2026р)

Луців Наталія, Капраль Андрій  
Національний лісотехнічний університет України

## ЄВРОПЕЙСЬКІ ПРАКТИКИ ПОВОДЖЕННЯ З ТВЕРДИМИ ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ ТА ЇХ ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ В УКРАЇНІ

У роботі проаналізовано європейські практики поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) як складової циркулярної економіки. Розглянуто організаційні моделі роздільного збору (door-to-door, комбіновані та змішані системи), а також економічні інструменти стимулювання, зокрема PAYT, DRS та EPR. Наведено результати впровадження цих підходів у країнах ЄС та окреслено їх ефективність на рівень переробки відходів. Визначено основні проблеми політики поводження з ТПВ в Україні та роль територіальних громад у її трансформації.

**Ключові слова:** тверді побутові відходи; циркулярна економіка; роздільний збір відходів; door-to-door collection; економічні інструменти управління відходами; депозитно-заставні системи (DRS); розширена відповідальність виробника (EPR); PAYT; територіальні громади; Європейський Союз; Україна.

Європейська модель поводження з твердими побутовими відходами базується на концепції циркулярної економіки, відповідно до якої відходи розглядаються як потенційний

ресурс, а не як кінцевий продукт споживання [1]. Ключовою передумовою ефективного рециклінгу є якісне накопичення відходів, що забезпечується через системи роздільного збору на рівні домогосподарств [2].

Відповідно до Директиви 2008/98/EC ЄС держави-члени зобов'язані забезпечити окреме збирання щонайменше чотирьох основних фракцій твердих побутових відходів: паперу, металу, пластику та скла [3].

Практична реалізація зазначених вимог у країнах ЄС здійснюється через комплекс інституційних, організаційних та економічних інструментів, спрямованих на підвищення рівня сортування та якості вторинної сировини. До основних організаційних інструментів належать системи роздільного контейнерного збору та door-to-door collection [2,4]. Ці інструменти є елементами різних організаційних моделей управління відходами, серед яких виокремлюють door-to-door, комбіновані та змішані системи.

Модель door-to-door collection передбачає індивідуалізований збір відходів безпосередньо від домогосподарств із попереднім сортуванням за фракціями та їх регулярним вивезенням, що забезпечує високий рівень контролю та якості вторинної сировини. Комбінована модель базується на поєднанні різних підходів залежно від морфологічного складу відходів, зокрема door-to-door для окремих фракцій (наприклад, органіки або паперу) та пунктів прийому (bring system) для скла та інших матеріалів. Такий підхід дозволяє оптимізувати логістичні витрати та підвищити ефективність системи загалом. Змішана модель характеризується одночасним використанням різних способів збору без чіткої функціональної диференціації, що є характерним для перехідного етапу розвитку систем управління відходами. У таких умовах ефективність роздільного збору залишається обмеженою через нерівномірне охоплення населення та недостатній рівень контролю.

Ефективність реалізації вимог Директиви 2008/98/EC та вибір моделі організації системи поводження з відходами визначаються державною та муніципальною політикою країн – членів ЄС. Вирішальними чинниками є рівень економічного розвитку, інституційна спроможність органів місцевого самоврядування та ступінь сформованості екологічної культури населення. Важливу роль відіграють також соціально-економічні умови та поведінкові практики домогосподарств, що безпосередньо впливають на результативність системи роздільного збору.

Суттєве значення мають економічні інструменти стимулювання, зокрема механізм «pay-as-you-throw» (PAYT), який передбачає диференційовану оплату залежно від обсягів змішаних відходів. Такий підхід формує прямий фінансовий стимул до сортування та зменшення утворення відходів. У країнах ЄС, зокрема Бельгії та Італії, впровадження PAYT забезпечило зменшення частки змішаних відходів і підвищення рівня їх роздільного збору [5].

Додатково застосовуються депозитно-заставні системи (DRS), які забезпечують повернення тари через грошову винагороду та демонструють високі показники ефективності для пакувальних матеріалів, зокрема PET-пластику та алюмінію. Яскравим прикладом є Німеччина, де система DRS забезпечує рівень повернення тари понад 90 %. Аналогічні результати демонструють країни Скандинавії, де депозитні системи є ключовим елементом політики поводження з упаковкою [6].

Суттєвим інституційним інструментом є розширена відповідальність виробника (EPR), що передбачає фінансування збору та переробки продукції виробниками. Це дозволяє частково перенести фінансове навантаження з муніципалітетів на бізнес-сектор та стимулює впровадження екодизайну продукції. У Німеччині, Франції та Австрії EPR охоплює широкий спектр продукції, включаючи пакування, електронні відходи та батарейки [1,5].

Також застосовуються адміністративні інструменти регулювання, зокрема штрафи за порушення правил сортування та обмеження на захоронення необроблених відходів. У Литві діють санкції для домогосподарств і операторів системи поводження з відходами, тоді як у Німеччині та Австрії впроваджено жорсткі обмеження на захоронення змішаних відходів [4].

Сукупність зазначених інструментів формує в ЄС багаторівневу систему управління відходами, орієнтовану на мінімізацію захоронення та максимізацію рівня рециклінгу.

Результати практичної реалізації моделей роздільного збору твердих побутових відходів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Ефективність впровадження моделей поводження з ТПВ в окремих країнах ЄС

| Країна    | Модель збору           | Рівень охоплення населення | Рівень переробки ТПВ (%) |
|-----------|------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Німеччина | door-to-door (домінує) | >90 %                      | 65–67                    |
| Австрія   | комбінована            | ~75–80 %                   | 58–60                    |
| Італія    | door-to-door (північ)  | 70–85 %                    | 64–66                    |
| Литва     | змішана                | ~65–75 %                   | 45–48                    |
| Бельгія   | door-to-door           | >85 %                      | 52–55                    |

Джерело: складено автором на основі даних Eurostat, OECD, European Environment Agency.

Отже, результати порівняльного аналізу свідчать, що найвищих показників переробки твердих побутових відходів досягають країни, у яких поєднуються системи door-to-door collection, розвинені економічні стимули (PAYT та DRS) та високий рівень інституційної організації системи управління відходами. При цьому ключовим фактором ефективності є не лише вибір моделі збору, а комплексна інтеграція організаційних, економічних та регуляторних інструментів у єдину систему циркулярного управління відходами.

В Україні система поводження з твердими побутовими відходами перебуває на етапі інституційної трансформації. Національна стратегія управління відходами до 2030 року передбачає поступовий перехід до європейської моделі циркулярної економіки, однак її реалізація залишається ускладненою через фінансові, інституційні та організаційні обмеження [7]. Серед ключових проблем слід відзначити низький рівень роздільного збору, недостатній розвиток інфраструктури переробки, відсутність системних економічних стимулів для населення та обмежену координацію між різними рівнями управління [8, 9].

У країнах Європейського Союзу ключову роль у функціонуванні системи управління відходами відіграють органи місцевого самоврядування, оскільки саме на муніципальному рівні забезпечується практична реалізація державної політики у сфері поводження з відходами. Місцева влада визначає організаційні моделі збору, формує тарифну політику та створює умови, за яких роздільний збір стає економічно доцільним і соціально прийнятним. Важливим є також активне залучення приватного сектору через механізми державно-приватного партнерства, що охоплює створення сортувальних комплексів, логістичних центрів, станцій компостування та інфраструктури збору вторинної сировини. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність системи та зменшити фінансове навантаження на муніципальні бюджети.

В Україні територіальні громади також розглядаються як базовий рівень реалізації політики у сфері управління відходами, що закріплено Національною стратегією управління відходами до 2030 року [7]. Саме громади мають забезпечувати впровадження систем роздільного збору, розвиток локальної інфраструктури та формування нових підходів до ресурсного управління. Водночас практична реалізація цих завдань ускладнюється недостатнім фінансуванням в умовах війни, зношеністю інфраструктури, низькою інвестиційною привабливістю проєктів та слабкою координацією з центральними органами влади.

Особливої уваги потребують малі та сільські громади, для яких характерні високі логістичні витрати та обмежений доступ до сучасних інфраструктурних рішень. Додатковим стримувальним фактором є недостатній розвиток ринку вторинної сировини, що знижує економічну мотивацію до впровадження систем роздільного збору. У цих умовах перспективним напрямом розвитку є міжмуніципальне співробітництво, яке дозволяє об'єднувати ресурси для створення спільних сортувальних та переробних потужностей і підвищує економічну ефективність інвестицій.

Наукові дослідження підтверджують, що саме територіальні громади можуть стати основою формування локальних моделей циркулярної економіки [10]. До їх ключових функціональних можливостей належать впровадження систем роздільного збору, створення комунальних або партнерських сортувальних комплексів, застосування диференційованих тарифів, реалізація пілотних проєктів депозитних систем, а також розвиток локальних ринків вторинної сировини.

**Висновки.** Проведене дослідження свідчить, що європейські практики поводження з твердими побутовими відходами характеризуються високою ефективністю завдяки інтеграції організаційних моделей збору, економічних стимулів та інституційних механізмів регулювання. Визначальним чинником є забезпечення якісного формування потоків вторинної сировини на етапі її первинного накопичення. В Україні перехід до моделі циркулярної економіки у сфері управління відходами потребує системних змін, спрямованих на розвиток інфраструктури, запровадження економічних стимулів та посилення інституційної спроможності органів місцевого самоврядування. У цьому процесі ключову роль можуть відігравати територіальні громади як базовий рівень реалізації державної політики у сфері поводження з відходами та формування локальних моделей ресурсного управління.

1. European Commission. (2015). *Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>
2. Publications Office of the European Union. (2020). *Guidance for separate collection of municipal waste*. <https://doi.org/10.2779/691513>
3. European Parliament and Council of the European Union. (2008). *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. *Official Journal of the European Union*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>
4. European Environment Agency. (2016). *Economic instruments and separate collection systems – key strategies to increase recycling*. <https://www.eea.europa.eu/publications>
5. OECD. (2022). *Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060*. OECD Publishing. <https://www.oecd.org/environment/plastics>
6. Association of Cities and Regions for Sustainable Resource Management, & Eunomia Research & Consulting. (2023). *Deposit refund systems in the EU – 2023 update*. [https://www.acrplus.org/media/origin/images/technical-reports/2023\\_ACR\\_Deposit\\_Refund\\_Systems\\_EU\\_Report.pdf](https://www.acrplus.org/media/origin/images/technical-reports/2023_ACR_Deposit_Refund_Systems_EU_Report.pdf)
7. Кабінет Міністрів України. (2017). *Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року: Розпорядження від 8 листопада 2017 р. № 820-р*. <https://zakon.rada.gov.ua/go/820-2017-%D1%80>
8. Височанська, М. Я., & Мішенін, Є. В. (2024). Системи управління твердими побутовими відходами України з урахуванням європейського досвіду. *Агроекологічний журнал*, (1). <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299932>
9. Гербут, Я., & Самусевич, Я. (2024). Проблеми та перспективи розвитку сфери управління побутовими відходами в Україні. *Економіка та суспільство*, (68). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-169>
10. Макарова, Т. К., Доценко, В. І., & Карась, О. Г. (2025). Екологічний менеджмент управління відходами як складова процедури оцінки впливу на довкілля. *Municipal Economy of Cities*, (6), 96–108. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-96-108>

## АНАЛІЗ СТАНУ ОЧИСНИХ СПОРУД СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ВОДОВІДВЕДЕННЯ В УКРАЇНІ: ПРОБЛЕМИ, ВИКЛИКИ ТА МОЖЛИВОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ

За сучасних умов забезпечення водними ресурсами населення та потреб економіки, ефективне управління ними – проблема світового масштабу. В українських реаліях повномасштабне вторгнення росії до України у лютому 2022 року привело до додаткового небезпечного тиску на водні ресурси та пов'язані із ними об'єкти, такі як порушення роботи чи руйнування систем водопостачання й водовідведення, потрапляння вибухонебезпечних компонентів, ракетного палива та специфічних забруднювачів до водойм.

Порівняно з іншими європейськими державами в Україні проблема управління стічними водами різного походження є дуже актуальною. Варто зазначити, що орієнтовно тільки 50% стічних вод зазнає повного біологічного очищення [1]. Сукупність вищевказаних чинників та існуючих проблем забруднення водних об'єктів, спричинених надмірним антропогенним впливом через діяльність підприємств різного профілю, спонукають до аналізу нагальних проблем, зокрема тих, що пов'язані із станом очисних систем централізованого водовідведення.

**Основні проблеми функціонування очисних споруд системи централізованого водовідведення в Україні.**

- **Фізична зношеність обладнання та інженерних мереж.** Результати аналізу водопровідно-каналізаційного господарства засвідчив значну зношеність багатьох трубопроводів та незадовільний стан (понад 40%). На ділянках, сильно пошкоджених корозією, часто відбуваються прориви й виникають аварійні ситуації.
- **Застарілість обладнання, неефективне функціонування та перевантаженість очисних споруд системи централізованого водовідведення.** Проблема фізичного зносу стосується й більшості очисних споруд, запроектованих і введених в експлуатацію ще в 70-80-х роках ХХ століття. Станом на 2025 рік 58,4% таких споруд потребували повної реконструкції [2]. Обладнання характеризується високим рівнем енергоспоживання та низьким ККД. Неефективність функціонування очисних споруд, яка позначається на недостатньому очищенні стічних вод, з одного боку, спричинена використанням застарілих методів очищення, а з другого, перевантаженістю очисних споруд. Розростання меж населених пунктів, їхня інтенсивна забудова й зростання кількості населення у них, приводить до зростання обсягів побутово-господарських стічних вод та істотної зміни їхнього якісного та кількісного складу. Недостатньо очищені стічні води часто містять надлишкові концентрації біогенних елементів – нітрогену та фосфору, що потрапляючи у водні об'єкти, викликають їхню евтрофікацію [3]. Також додаткове навантаження на роботу очисних споруд створюють виробничі стічні води, які потрапляють до каналізаційних мереж від підприємств, що знаходяться на території населених пунктів.

**Основні етапи підвищення ефективності функціонування очисних споруд муніципальних стічних вод**

- **Дотримання нормативних документів щодо приймання стічних вод, які потрапляють у каналізаційні мережі населених пунктів.** За останні роки відбулось напрацювання і подання ряду нормативних документів, якими регулюється очищення та скидання стічних вод в уразливих зонах, нормування щодо забруднюючих речовин, які скидають до систем. Серед цих документів варто виокремити Правила, якими регулюється приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення [4]. У додатку 1 наведений перелік виробничих процесів, у яких утворюються виробничі стічні води, які потребують обов'язкового попереднього очищення на локальних очисних спорудах [5]. Це зменшує навантаження на інженерні мережі населених пунктів.

- **Впровадження інноваційних кроків для підвищення енергоефективності та якості очищення стічних вод.** Заміна енергоємного обладнання насамперед стосується заміни старих каналізаційних насосних станцій на нові з автоматизованою роботою двигуна, наявністю самоочисних коліс для покращення роботи насосів (зниження витрат електроенергії складає орієнтовно до 40%). Сучасні методи очищення включають застосування сучасних аеротенків (за можливості закритого типу), у яких розділені зони анаеробного та аеробного очищення. Для останньої передбачено автоматичне регулювання аерації та уникнення втрат електроенергії. Застосування мембранних біореакторів робить можливим повторне використання води для технічних цілей, що ефективно позначається на управлінні водними ресурсами.

**Головні виклики щодо модернізації/реконструкції очисних споруд муніципальних стічних вод.**

- **Повільна модернізація/перебудова очисних споруд та інженерних мереж.** Наявний стан очисних споруд вимагає значних капіталовкладень для проведення технічного переоснащення цих очисних систем та каналізаційних трубопроводів. Здійснення глибокої модернізації тільки за кошти обласних та місцевих бюджетів є малореальною, через низьку окупність, недостатність коштів, кінцевий обсяг яких складно прорахувати через довготривалість процесу. На фінансування впливає також і повномасштабна війна: кошти вкладають в обладнання, яке необхідне для постійної роботи пристроїв об'єктів водної інфраструктури навіть за умов тотального відключення електроенергії. Непоодинокими є ситуації, коли фінансові ресурси потрібно витратити для якомога швидкого ремонту споруд критичної інфраструктури, пошкоджених ракетними чи дронними влучаннями. Залучення коштів міжнародних інвесторів у формі грантів чи кредитів вимагає якісно розроблення проєкту, у якому будуть враховані всі дані щодо поточних економічних витрат та екологічних наслідків, які спричинені функціонуванням наявних очисних систем. У цьому проєкті повинна бути покроково обґрунтована доцільність запровадження нових технологічних схем з сучасним обладнанням, використанням покращених методів очищення, автоматизованим контролем за обладнанням, наявністю якого зводить до мінімуму ризик потрапляння неочищених стічних вод до водних об'єктів.

**Аналіз проведення модернізації очисних споруд муніципальних стічних вод (на прикладі очисних споруд КП «Дрогобичводоканал»).**

На прикладі очисних споруд, введених в експлуатацію понад 50 років тому, які обслуговуються комунальним підприємством «Дрогобичводоканал», проаналізовано, чи проведення ремонту окремих споруд, що включені до технологічної схеми очищення, є достатнім для отримання тривалого ефективного результату. Очисні споруди залучені до приймання та очищення стічних вод міст Дрогобича, Трускавця, Борислава, Стебника та розташованих поблизу 13 сіл. Функціонуючі очисні споруди забезпечують очищення близько 35 тис. м<sup>3</sup> на добу. Проведення часткового оновлення включало реконструкцію первинних радіальних відстійників і ремонт насосної станції. Цей процес тривав два роки і дав змогу отримувати задовільну якість очищення стічних вод, які можна повертати у річку Тисмениця (басейн Дністра). Загалом вартість проведених робіт становила 21,5 млн. гривень, залучених з обласного та місцевого бюджетів, а позитивним результатом стало зменшення забруднення водойми, куди скидаються доочищені біологічним способом стічні води та уникнення аварійних ситуацій впродовж 2025 року [6].

Проведений подальший аналіз якості стічних вод виявив, що заміни окремого обладнання недостатньо, щоб забезпечити процес стабільного глибокого очищення. Необхідною є повна модернізація очисних систем, що буде тривалішою та вимагатиме значних капіталовкладень. Етапи такої реконструкції будуть вказані у дорожній карті, напрацьованій відповідно до імplementованих в українське законодавство європейських екологічних стандартів. Реалізація пілотного проєкту буде підтримана програмою ЄС EU4Green Recovery East у рамках «зеленої» відбудови України [7].

**Висновки.** Ефективне функціонування очисних споруд, зокрема тих, на яких відбувається очищення муніципальних стічних вод, є невід’ємною частиною Водної стратегії України [8]. Належно очищені стічні води, які повертають у водойми, не спричинятимуть додаткового антропогенного навантаження на них, що сприятливо вплине на екологічний стан водних екосистем. Ефективне функціонування очисних споруд муніципальних стічних вод є складовою екологічної безпеки населених пунктів та збереження здоров’я населення.

1. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році / М-во розвитку громад та територій України. Київ, 2024. 356 с. URL: <https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/nacionalna-dopovid-pro-iakist-pitnoyi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostacannia-ta-vodovidvedennia-v-ukrayini-u-2023-r.pdf> (дата звернення: 25.04.2026). <sup>[P]</sup><sub>SEP</sub>

2. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2024 році / М-во розвитку громад та територій України. Київ, 2025. 412 с. URL: <https://mindev.gov.ua/storage/app/sites/1/uploaded-files/nacionalna-dopovid-pro-iakist-pitnoyi-vodi-ta-stan-za-2024-rik.pdf> (дата звернення: 25.04.2026).

3. Wastewater Reuse in the EU and Southern European Countries: Policies, Barriers and Good Practices / J. Malinauskaite et al. Sustainability. 2024. Vol. 16, iss. 24. 11277. 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/su162411277>.

4. Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення : наказ М-ва регіон. розвитку, буд-ва та житл.-комун. госп-ва України від 01.12.2017 № 316. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18> (дата звернення: 25.04.2026).

5. Перелік виробничих процесів, під час здійснення яких споживач повинен мати локальні очисні споруди для попереднього очищення стічних вод перед їх скиданням до системи централізованого водовідведення та очищення стічних вод: додаток 1 до Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення : наказ М-ва регіон. розвитку, буд-ва та житл.-комун. госп-ва України від 01.12.2017 № 316.

6. Дбають про екологію: триває реконструкція очисних споруд Дрогобицького водоканалу : новина / Офіційний сайт Дрогобицької міської ради. 2023. URL: <https://drohobych-rada.gov.ua/dbayut-pro-ekologiyu-trivaie-rekonstru/> (дата звернення: 25.04.2026).

7. Підготовка до модернізації водної інфраструктури: визначено пілотні громади : новина / Офіційний сайт Міністерства розвитку громад та територій України. 2026. URL: <https://mindev.gov.ua/news/pidhotovka-do-modernizatsii-vodnoi-infrastruktury-vyznacheno-pilotni-hromady> (дата звернення: 25.04.2026).

8. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-p#Text> (дата звернення: 25.04.2026).

**Майстрок Наталія**  
*Інститут соціології НАН України*

## **ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УКРАЇНІ**

У сьогоденні міцним важелем впливу на глобальну політику та лідерство є штучний інтелект (ШІ), який характеризується як найбільш трансформаційна технологія ХХІ століття. ШІ поступово стає базовим елементом сучасних інституцій - від цифрової економіки до

інших сфер функціонування суспільства, відкриває нові можливості у науці, медицині, освіті, бізнесі, держуправлінні, сприяючи підвищенню ефективності, точності, продуктивності. Він все більше впроваджується в повсякденне життя від охорони здоров'я до транспорту, швидко переходячи від лабораторії до суспільства та індивіда. Штучний інтелект знаходиться у центрі уваги таких основних глобальних гравців, - ТНК, держав, різних транснаціональних організацій тощо, збільшуючи, з одного боку, конкуренцію між ними, а з іншого – відкриваючи нові можливості для міжнародної співпраці. В цілому вплив ШІ на економіку та суспільство продовжує зростати, при цьому характерною тенденцією останнього року стало, окрім зростання загального обсягу інвестицій у ШІ, урізноманітнення джерел та розширення геополітичного вектору інвестицій у цей напрям. Так, у 2024 році приватні інвестиції у США зросли до 109,1 млрд дол., що майже в 12 разів перевищує показник Китаю з 9,3 млрд. дол. та Великої Британії в 24 рази з 4,5 млрд. дол. У 2024 році установи США створили 40 нових моделей ШІ, Китай – 15, а Європа – 3 нових моделей. В цілому США зберігають своє лідерство за кількісними показниками, китайські моделі скоротили розрив у якісному аспекті, а також зростанні продуктивності. Водночас розробка моделей стає дедалі глобальнішою, з додаванням таких регіонів, як Близький Схід, Латинська Америка та Південно-Східна Азія. Слід зауважити, що провідною тенденцією останніх років стало пришвидшення темпів впровадження технологій, пов'язаних з ШІ у промисловість, бізнес та інші сфери життєдіяльності соціуму. Так, у 2024 р. майже 90% нових моделей ШІ було запроваджено у промисловості, а у 2023 р. - 60%, у бізнесі використання ШІ в організаціях у 2024 р. досягло 78%, а у 2023 р. цей показник становив 55% (*The 2025 AI Index Report*, 2025). З початку 2025 року промисловість випустила понад 90% відомих моделей, причому деякі з них подекуди перевищують базові показники можливостей рівня PhD, мультимодального мислення та математичних змагань. В цілому у 2025 році рівень впровадження ШІ в організаціях досяг 88%, а 4 з 5 студентів університетів зараз використовують генеративний ШІ. Понад 80% учнів старших класів та коледжів США використовують ШІ для виконання шкільних завдань.

Україна, не зважаючи на війну, глобальні суперечності, конфлікти, глобальну конкуренцію, спромоглася все ж таки не втратити, а подекуди навіть і покращити свої позиції як у глобальному, так і локальному зрізі. Це відбулося багато в чому завдяки розвитку інформаційного суспільства в Україні, цифрової економіки, глобальних інформаційних технологій, зокрема тих, що пов'язані із штучним інтелектом. Так, У 2025 році три найбільші українські AI-стартапи оцінювалися у понад \$14,5 млрд, а дві українські AI-компанії стали всесвітньо відомими – Grammarly та People.ai, продуктами яких користуються мільйони людей по всьому світу. Мінцифрою було профінансовано розвиток понад 65 стартапів в індустрії штучного інтелекту. Зокрема, такі проєкти як 3DLOOK, Lookerz, FlyAgData, elai, Zibra AI та інші у сфері Інтернет-торгівлі, агротехнологій, відеоіндустрії тощо. Загалом Мінцифри прагне, щоб Україна до 2030 року увійшла до топ - 3 країн світу за рівнем розроблення та впровадження рішень на основі штучного інтелекту в державному управлінні, цифрових послугах та ключових секторах економіки. Задля цього планується розробити національну AI-стратегію та програму інвестування в дослідження та розроблення AI-рішень; досягнути зростання AI-стартапів мінімум на 50% щороку; упровадити AI-рішення в пріоритетних сферах: державному управлінні, цифрових послугах, освіті, охороні здоров'я, військових технологіях та ін. (*WINWIN*, 2025). В цілому Україна вже працює над моделлю штучного інтелекту, яка дозволить державним сервісам і критичним системам зберігати автономність навіть у разі зміни правил гри з боку великих міжнародних постачальників ШІ. За цих умов Мінцифра робить ставку на ШІ-суверенітет і власну інфраструктуру, щоб державні сервіси не залежали від зовнішньої політики чи рішень приватних компаній. Для цього передбачається розвиток національної мовної моделі та власної інфраструктури AL Factory (Шевченко, 2026).

Також у нашому суспільстві активно продовжується робота над вдосконаленням власної відповідальної екосистеми ШІ та поглибленням міжнародної, зокрема європейської

співпраці у цій сфері. Слід згадати, що зберігаючи традицію, яка передбачає орієнтацію на дії, що мають на меті досягнення максимуму ефективності при мінімальних ризиках, Європа першою запропонувала світові свою систему відповідальної екосистеми ШІ (Закон ЄС про штучний інтелект (AI Act) та інші законодавчі документи). В цілому у світовому вимірі кількість законодавчих згадок про ШІ у 2024 р. зросла на 21,3 % у 75 країнах по зрівнянню з 2023 р. Але все ж таки, як зазначається у Звітах про Індекс ШІ за останні роки, відповідальна екосистема ШІ розвивається нерівномірно. Доволі часто серед компаній зберігається розрив між визнанням ризиків, пов'язаних із ШІ та вжиттям змістовних заходів, а стандартизовані оцінки ризиків серед розробників промислових моделей залишаються вкрай рідкими. Проблему посилює той факт, що покращення одного аспекту відповідального ШІ, наприклад, безпеки, може призвести до погіршення іншого показника, зокрема точності.

Окрім раніше розроблених нормативно-правових документів, що регулюють діяльність у зазначеній сфері, 15 травня 2025 року Україна приєдналася до Рамкової конвенції Ради Європи про ШІ, права людини, демократію та верховенство права. Цей документ визначає наступні принципи, яких має дотримуватися держава у формуванні й застосуванні ШІ-продуктів у публічному секторі: повага до людської гідності; прозорість і підзвітність; недискримінація; захист приватності; надійність та безпека. Раніше Конвенцію підписали 15 урядів, серед яких Велика Британія, США, Канада, ЄС, Японія, Ізраїль та ін. Документ розробляли протягом трьох років представники держав-учасників Ради Європи та інших країн, що долучилися до процесу, а також представники бізнесу, громадськості. Зважаючи на те, що Україна активно інтегрується у європейський цифровий простір, формування вимог безпечного використання ШІ з урахуванням європейських та світових стандартів, є надзвичайно важливим завданням (*Безпечний ШІ для мільйонів українців*, 2025). Ці заходи мають надзвичайну актуальність, враховуючи амбітні плани Європейської Комісії у сфері зміцнення цифрової інфраструктури ЄС. Для цього планується створити гігафабрики штучного інтелекту, які об'єднають величезні обчислювальні потужності та центри обробки даних для навчання та розробки складних моделей ШІ. Гігафабрики мають підтримати стратегічну автономію ЄС у критично важливих промислових секторах і науці, що вимагають державних і приватних інвестицій. Зокрема, через програму InvestAI планується залучити 20 млрд. євро. Єврокомісією заплановано впровадження Закону про розвиток хмарних технологій і штучного інтелекту, що має збільшити потужність центрів обробки даних у ЄС протягом наступних 5-7 років. Також ЄС планує залучати до Європи талановитих фахівців у сфері ШІ через стипендіальні програми, стажування і легальну міграцію; створення нових освітніх програм з генеративного ШІ для навчання молодих спеціалістів та перекваліфікації працівників. Важливим кроком для реалізації цього плану, на думку європосадовців, має створення «Служби підтримки Акту про штучний інтелект», яка слугуватиме центральним контактним центром для отримання інформації й рекомендацій щодо Закону про штучний інтелект (Онопрієнко, 2025).

Таким чином, попри війну, в українському суспільстві спостерігаються активні цифрові інституційні трансформації, що охоплюють майже всі сфери суспільного життя, що має сприяти підвищенню конкурентоздатності країни в умовах сучасного геополітичного, гео економічного протистояння та глобального перерозподілу основних сфер впливу. Так, Україна вже входить до числа лідерів Східної Європи за розвитком технологій штучного інтелекту. Зокрема, у 2025 році розмір місцевого ШІ-ринку сягнув майже 420 млн. дол., в країні з'являються десятки нових ШІ-стартапів, а також спостерігається збільшення використання технологій, пов'язаних із ШІ у повсякденній роботі бізнесу та різноманітних організацій. Разом з цим, за даними досліджень AI Economy Institute, рівень використання технологій штучного інтелекту в Україні складає близько 9.1%, що свідчить про значний потенціал для подальшого зростання (*ШІ в дії*, 2026). В цілому, Україна будує «агентивну державу», де ШІ бере на себе рутину, а люди отримують сервіс за лічені секунди. У цьому контексті на 2026 рік заплановано запуск ШІ-асистента у застосунку Дія; голосу держави – голосового функціоналу для державних сервісів; пришвидшення євроінтеграції; побудова

прозорого судочинства за допомогою ШІ (*Рік ШІ-трансформації*, 2026). Що стосується населення, то результати опитування громадської думки КМІСу «Використання штучного інтелекту населенням України» за січень 2026 року (взяли участь 1003 респонденти) свідчать про те, що використання ШІ в Україні вже має більш помітне поширення, а також те, що з одного боку - сформовано високий рівень обізнаності, з іншого – існує значний розрив між знанням і практичним використанням. Так, понад 60% населення фактично не використовують ШІ, з них: 10% уперше чують і не знають, що це таке; 41% знають про ШІ, але ніколи ним не користувалися; ще 12% лише пробували, але не використовують його надалі. В цілому, хоча рівень обізнаності населення про штучний інтелект є досить високим (близько 90% знають про ШІ), його реальне впровадження в повсякденну практику суттєво відстає. Водночас близько 37% населення мають хоча б певний досвід використання ШІ (включно із нерегулярним використанням). Серед них: 17% використовують його щодня або майже щодня; 10% користуються декілька разів на тиждень; ще близько 10% користуються рідше (кілька разів на місяць або ще рідше). Таким чином, за результатами дослідження регулярними користувачами ШІ (щонайменше раз на тиждень) є вже 27% українців, що свідчить про те, що Україна перебуває на етапі активного, але ще не масового впровадження технологій штучного інтелекту у життя, а частка щоденних користувачів (17%), яка є вже досить значною, засвідчує процес формування ядра активних користувачів, які інтегрували ШІ у свою роботу або повсякденне життя (*Використання штучного інтелекту...*, 2026).

1. *The 2025 AI Index Report/ HAI.* (2025). <https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report>
2. *WINWIN: Україна затвердила Стратегію цифрового розвитку інновацій до 2030 року* | Міністерство освіти і науки України. (2025, 14 січня). <https://mon.gov.ua/news/winwin-ukraina-zatverdyla-stratehiu-tsyfrovoho-rozvytku-innovatsii-do-2030-roku>
3. Щевченко, Л. (2026, 19 березня). Як Україна готується до відключення ШІ в обороні: у Мінцифрі розкрили план дій. <https://share.google/LxA3xDwr7QvOgaeqr>
4. *Безпечний ШІ для мільйонів українців: Україна підписала Рамкову конвенцію про штучний інтелект та права людини.* (2025, 15 травня). <https://thedigital.gov.ua/news/technologies/bezpechniy-shi-dlya-milyoniv-ukrayintsiv-ukraina-pidpisala-ramkovu-konventsuyu-pro-shtuchniy-intelekt-ta-prava-lyudini>
5. Онопрієнко, О. (2025, 9 квітня). *Європейська комісія представила амбітний план дій для лідерства Європи у сфері штучного інтелекту.* [dev.ua https://share.google/96D7JR2oAMQQTvm](https://share.google/96D7JR2oAMQQTvm)
6. *Рік ШІ-трансформації країни: що змінилося для мільйонів українців та держави.* (2026). <https://thedigital.gov.ua/news/shtuchniy-intelekt/rik-shi-transformatsiyi-krayiny-shcho-zminylosia-dlia-milyoniv-ukrayintsiv-ta-derzavy>
7. *ШІ в дії: як компанії рухають Україну в майбутнє.* (2026). [https://projects.obozrevatel.com/shi-v-dii-iaki-kompanii-rukhaiut-ukrainu-v-maybutnie/?fbclid=IwY2xjawRDMp9leHRuA2FlbQEwAGFkaWQBqzCtz-tQC3NydGMGYXBwX2lkDzQwOTk2MjYyMzA4NTYwOQABHimxQkdbiPXtug3fKtn7Czc0BEEsiVzOgKiQ4\\_Ijx2L8A6-pXUNYoTXNaGb3\\_aem\\_M0ekINq-bQIzs28tM9p0mQ&utm\\_medium=paid&utm\\_source=fb&utm\\_id=120210534511900731&utm\\_content=120243338045430731&utm\\_term=120243338045440731&utm\\_campaign=120210534511900731](https://projects.obozrevatel.com/shi-v-dii-iaki-kompanii-rukhaiut-ukrainu-v-maybutnie/?fbclid=IwY2xjawRDMp9leHRuA2FlbQEwAGFkaWQBqzCtz-tQC3NydGMGYXBwX2lkDzQwOTk2MjYyMzA4NTYwOQABHimxQkdbiPXtug3fKtn7Czc0BEEsiVzOgKiQ4_Ijx2L8A6-pXUNYoTXNaGb3_aem_M0ekINq-bQIzs28tM9p0mQ&utm_medium=paid&utm_source=fb&utm_id=120210534511900731&utm_content=120243338045430731&utm_term=120243338045440731&utm_campaign=120210534511900731)
8. *Використання штучного інтелекту населенням України.* (2026, 26 березня). <https://kiis.com.ua/?lang=ukr&cat=reports&id=1599&page=1>

## **ІНСТИТУЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ ВЗАЄМОДІЇ МІСЦЕВИХ ОРГАНІВ ВЛАДИ: ПОЛЬСЬКИЙ ДОСВІД ТА МОЖЛИВОСТІ ЙОГО АДАПТАЦІЇ В УКРАЇНІ**

Сучасні процеси децентралізації та трансформації публічного управління зумовлюють необхідність формування ефективних механізмів взаємодії між різними рівнями місцевої влади. У цьому контексті особливого значення набуває вивчення зарубіжного досвіду, зокрема Республіки Польща, де реформування системи територіального управління здійснювалося на засадах субсидіарності, партнерства та інституційної взаємодії.

Система місцевого самоврядування у Польщі характеризується трирівневою структурою (гміна, повіт, воєводство), що забезпечує чіткий розподіл повноважень та відповідальності між органами влади. Ключовою особливістю є високий рівень автономії гмін, які виступають базовими одиницями управління та мають значні фінансові й організаційні ресурси для реалізації місцевої політики [1]. Водночас ефективна взаємодія між рівнями забезпечується через інституціоналізовані механізми координації, співпраці та делегування повноважень.

Важливим елементом польської моделі є розвиток міжмуніципального співробітництва, що реалізується через створення спільних організацій, асоціацій громад та партнерських мереж. Такі форми взаємодії дозволяють оптимізувати використання ресурсів, забезпечити реалізацію масштабних інфраструктурних проєктів і підвищити якість публічних послуг. Крім того, значну роль відіграє участь місцевих органів влади у реалізації програм регіонального розвитку за підтримки Європейський Союз, що сприяє інтеграції територій у європейський простір.

Інституційна взаємодія в Польщі також передбачає активне залучення громадянського суспільства та бізнесу до процесів прийняття управлінських рішень. Механізми публічних консультацій, бюджетування участі та електронного врядування забезпечують прозорість діяльності органів влади та підвищують рівень довіри населення [2]. Такий підхід формує багаторівневу модель управління, де взаємодія базується не лише на адміністративних, але й на соціально-комунікаційних зв'язках.

Особливу увагу слід приділити фінансовим інструментам взаємодії, які включають систему горизонтального та вертикального вирівнювання, спільне фінансування проєктів і використання грантових ресурсів. Це дозволяє зменшити диспропорції розвитку територій і забезпечити більш рівномірний соціально-економічний розвиток регіонів.

Узагальнюючи, польський досвід демонструє, що ефективна взаємодія місцевих органів влади формується на основі поєднання інституційної автономії, чіткої регламентації повноважень, розвитку партнерських мереж і використання сучасних управлінських інструментів. Для України адаптація таких підходів є особливо актуальною в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення, оскільки дозволяє підвищити спроможність територіальних громад, забезпечити ефективне використання ресурсів та зміцнити систему публічного управління.

1. Swianiewicz, P. (2014). *Reforming local government in Poland. Top-down and bottom-up processes.* Warsaw: Ministry of Administration and Digitization. URL: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-663-11258-7\\_14.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-663-11258-7_14.pdf)

2. Levitas, A. (2018). *Local government reform as state building: What the Polish case says about «decentralisation».* Public Governance, 3(45). Doi:10.15678/ZP.2018.45.3.01

## ЦИФРОВІЗАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПРАВА ТА РОЛЬ ENGLISH FOR SPECIFIC PURPOSES (ESP) У ФОРМУВАННІ ЄДИНОГО ЗЕЛЕНОГО ПРОСТОРУ ЄС

Процес екологізації економіки ЄС, закріплений у European Green Deal, вимагає не лише технологічного переозброєння, а й створення абсолютно нової нормативно-правової бази. В умовах глобальної цифровізації, інформаційні технології стають «мостом» між правовою нормою та її практичною реалізацією. У цьому контексті виникає гостра потреба у стандартизації юридичних та екологічних понять, де англійська мова виступає не просто засобом комунікації, а термінологічним фундаментом для алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) та автоматизованих систем моніторингу довкілля.

Екологізація економіки вимагає жорсткого контролю за викидами, використанням ресурсів та управлінням відходами. IT-рішення в галузі права (Legal Tech) стають ключовими для забезпечення прозорості. Коротко проаналізуємо окремі застосування IT у різних сферах.

Перспективним напрямом трансформації механізмів природокористування є інтеграція технології блокчейн, зокрема впровадження самовиконуваних смарт-контрактів для регулювання квот на викиди вуглецю (CO<sub>2</sub>). Такий підхід дозволяє перевести систему екологічного контролю на якісно новий рівень, де нарахування штрафних санкцій за перевищення лімітів або надання бонусів за дотримання норм відбувається в автоматичному режимі. Це мінімізує корупційні ризики та виключає суб'єктивний фактор у діяльності контролюючих органів, забезпечуючи прозорість і невідворотність відповідальності за порушення екологічного законодавства.

Паралельно з автоматизацією розрахунків критично важливого значення набуває цифровізація міжнародних екологічних стандартів, зокрема серії ISO. Переведення цих нормативів у формат машиночитаного коду дозволяє безпосередньо інтегрувати юридичні вимоги у системи планування ресурсів підприємства (ERP-системи). Таке технологічне рішення забезпечує автоматичний комплаєнс виробничих процесів з міжнародними екологічними стандартами, оскільки правові вимоги стають невід'ємною частиною алгоритмів управління виробництвом, що сприяє системній екологізації промислового сектору. Слід підкреслити, що екологізація сучасної економіки неможлива без аналізу великих масивів даних (Big Data), які перетворюють статистичні показники на дієві інструменти політичного та економічного впливу. У цьому контексті особливого значення набуває режим управління екологічними даними (Environmental Data Governance). Англійська мова тут виступає мовою метаданих, що забезпечує відкритий доступ до інформації та дозволяє вченим і юристам з різних країн ЄС обмінюватися даними в реальному часі, створюючи єдиний інформаційний простір для прийняття управлінських рішень. Важливим інструментом інтеграції є розробка спеціалізованих IT-платформ (глосаріїв та онтологій) на базі англійської мови. Це критично для забезпечення термінологічної уніфікації, оскільки такі засадничі категорії як “Sustainability”, “Resilience” та “Circular Economy” мають специфічне юридичне навантаження в актах ЄС, яке часто втрачається при неточному перекладі, що створює ризики для коректної роботи автоматизованих систем управління.

Водночас стрімке впровадження інтелектуальних систем створює низку правових колізій, пов'язаних із визначенням відповідальності за рішення, прийняті алгоритмами штучного інтелекту. У сфері екологічного моніторингу постає фундаментальне питання щодо суб'єкта «юридичної вини» у випадках, коли помилковий прогноз ШІ призводить до екологічної катастрофи або несвоєчасного реагування на загрози. Визначення правового статусу таких рішень та розмежування відповідальності між розробниками, операторами систем та державними інституціями залишається одним із ключових викликів для сучасної юридичної науки. Окремим перспективним напрямом тут стає використання методів обробки природної мови (Natural Language Processing, NLP) для аналізу тисяч сторінок екологічних директив ЄС

(зокрема, Directive 2008/98/EC on waste). Англomовні алгоритми здатні в автоматичному режимі виявляти суперечності між національним законодавством та вимогами Європейського Союзу, що значно прискорює процес гармонізації правового поля. Поряд з лінгвістичним аналізом, критичну роль відіграє технологічний контроль, зокрема супутниковий моніторинг у межах програми Copernicus [1]. Використання ІТ-інструментів для дистанційної фіксації порушень екологічного права дозволяє створювати неспростовну доказову базу. Супутникові знімки, інтерпретовані за допомогою англomовного програмного забезпечення, все частіше стають юридичними доказами в міжнародних судах, що вимагає від експертів високого рівня технічної та мовної компетенції. В умовах сучасної геополітичної нестабільності та воєнних дій на території України, питання безпеки довкілля набуває принципово нового юридично-лінгвістичного виміру. Зокрема, особливої гостроти набуває дискусія на рівні ООН та ЄС щодо кодифікації поняття “Екоцид” (Ecoside) та його внесення до Римського статуту як п’ятого злочину проти миру. Англійська мова у цьому процесі стає інструментом прецизійного формулювання дефініцій, що є критично важливим для коректної роботи ІТ-систем автоматизованої фіксації екологічних збитків, де будь-яка лінгвістична неоднозначність може перешкодити юридичній кваліфікації злочину. Цей процес нерозривно пов’язаний із формуванням доказової бази для отримання репарацій (Documentation for Reparations). Сьогодні вся інформація про воєнні екологічні злочини в Україні готується за принципом двомовності, де англomовна версія є пріоритетною для залучення міжнародних фінансових інституцій та фондів відновлення. Спеціалізовані ІТ-платформи відіграють тут ключову роль, забезпечуючи автоматизований переклад, верифікацію та захищене зберігання даних, що підтверджує невід’ємність цифрових інструментів від процесів правового захисту довкілля. Подальша екологізація економіки має чіткий фінансовий підтекст, де право та ІТ-технології виступають ключовими регуляторами. Яскравим прикладом є механізм транскордонного вуглецевого регулювання ЄС (CBAM) [2]. Це складний правовий інструмент, реалізація якого повністю залежить від інтегрованих ІТ-систем обліку викидів. Для українських експортерів обов’язковою стає англomовна звітність за стандартами CBAM, що знову підкреслює роль мови як універсального інтерфейсу між національним виробником та європейським контролюючим органом. Паралельно з державним регулюванням, суттєвий вплив мають ринкові механізми, зокрема Green Finance та ESG-рейтинги. Сучасні інвестори оцінюють компанії за критеріями екологічної та соціальної відповідальності (Environmental, Social, Governance). У цьому процесі ІТ-технології забезпечують прозорість: спеціалізовані алгоритми проводять семантичний аналіз англomовних публічних звітів компаній для виявлення “грінвошингу” (greenwashing) – маніпуляцій з екологічною інформацією. Таким чином, використання англійської мови у поєднанні з інструментами аналізу тексту стає запобіжником проти дезінформації в екологічній сфері.

Розв’язання окреслених викликів, пов’язаних із цифровою трансформацією та відповідальністю інтелектуальних систем, вимагає не лише технічної уніфікації, а й лінгвістичної конвергенції. У цьому контексті особливої актуальності набуває розгляд англійської мови як інструменту гармонізації екологічного законодавства. Оскільки більшість протоколів блокчейну, мов програмування для смарт-контрактів та міжнародних стандартів ISO розробляються та адмініструються англійською мовою, вона де-факто стає лінгвістичним фундаментом для «цифрового права» (Digital Law). Використання англomовної термінології дозволяє уникнути смислових розбіжностей при перекладі складних юридико-технічних категорій, забезпечуючи ідентичність інтерпретації норм у різних юрисдикціях.

Більше того, англійська мова виступає медіатором у процесі глобальної гармонізації екологічних стандартів, оскільки саме вона є мовою міжнародного наукового дискурсу та міжурядових кліматичних угод. Уніфікація понятійного апарату на базі англійської мови спрощує інтеграцію національних систем екологічного моніторингу до єдиного світового інформаційного простору. Таким чином, володіння професійною англійською мовою стає не просто допоміжною навичкою, а стратегічним інструментом для правотворців та екологів, що дозволяє створювати транскордонні механізми захисту довкілля, які є лінгвістично зрозумілими

та технологічно сумісними на глобальному рівні. Відтак, англійська мова у сфері захисту довкілля фактично виконує роль *Lingua Franca*, без якої неможлива повноцінна інтеграція України до "зеленого" майбутнього ЄС. Це актуалізує впровадження концепції *English for Specific Purposes (ESP)* у підготовку еко-юристів та IT-фахівців. Сучасний спеціаліст має володіти мовою на рівні, що дозволяє працювати не лише з міжнародною документацією, а й з англійським програмним кодом екологічних систем, що є запорукою успішної цифровізації екологічного моніторингу. Практичним втіленням цієї стратегії є ініціатива ЄС щодо впровадження цифрових паспортів продуктів (*Digital Product Passports*). Створення цифрового сліду для кожного товару – від опису складу до розрахунку вуглецевого сліду – виконується саме англійською мовою. Це забезпечує безперешкодний обіг товарів на єдиному ринку ЄС та прозорість ланцюгів постачання, підтверджуючи, що англійська мова у сфері захисту довкілля фактично виконує роль *Lingua Franca*.

На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки. Екологізація економіки – це мультидисциплінарний процес, де IT забезпечує інструментарій, право – рамки, а англійська мова – зрозумілу всім учасникам комунікаційну платформу.

Для успішної інтеграції до ЄС Україна має створювати екологічні IT-продукти (реєстри, системи моніторингу), які від початку є білінгвальними та відповідають стандартам *Legal Tech* Євросоюзу.

Потреба у фахівцях на перетині дисциплін: юристів, які розуміють архітектуру баз даних, та IT-спеціалістів, які володіють міжнародним екологічним правом та вільною англійською мовою.

Створення єдиного цифрового екологічного простору, де правові норми виконуються автоматично, а збитки довкіллю (зокрема воєнні) фіксуються та оцінюються за уніфікованими міжнародними стандартами.

Сьогоднішні виклики війни та необхідність зеленого переходу вимагають від нас відмови від «паперової» екології на користь прозорих, цифровізованих та лінгвістично уніфікованих систем захисту довкілля.

1. European Space Agency. (n.d.). *Copernicus programme overview*. [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus)

2. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism (CBAM). (2023). <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj>

Носова Наталія

*ДУ «Інститут ринку і економіко-екологічних досліджень» НАН України*

## **ВПЛИВ ІНТЕГРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОГО ЗЕЛЕНОГО КУРСУ НА РЕФОРМУВАННЯ ПРАВОВОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЮ ЕКОНОМІКИ (НА ПРИКЛАДІ АГРОПРОДОВОЛЬЧОГО СЕКТОРУ)**

Інтеграція України до Європейського союзу потребує реформування правової системи України, розробки та прийняття законів, що впливають з законодавства Євросоюзу та кореспондують з ним. Цей процес відбувається на протязі багатьох років, після того, як після проголошення Україною незалежності (на початку 90-х років минулого століття) були парафовані домовленості з Євросоюзом щодо приведення вітчизняної законодавчої бази у

відповідність з вимогами європейського законодавства. А саме активна фаза цього процесу набула після підписання Україною Угоди з Євросоюзом у 2014 році, коли законодавча база України стала активно адаптуватись до європейського законодавства. Саме цей процес заклав наріжний камінь щодо незворотного руху України до вступу у Європейську спільноту. Прийняття законодавчих норм передували численні перемовини, підписання міжнародних угод, дотримання виконання безпекових норм.

Вибір Україною європейського вектору розвитку потребує й прийняття відповідних європейських законів відносно дотримання європейського «зеленого» курсу і виконання Цілей сталого розвитку щодо зменшення викидів вуглецю у навколишнє природне середовище.

За оцінками фахівців, найбільші викиди вуглецю у повітря відзначаються у таких галузях, як енергетична та добувна галузі, а також сільське господарство.

Керуючись законодавством, яке набрало чинності в Європейському Союзі і все більше поширюється на країни Єврозони, Україна також взяла на себе відповідні зобов'язання з адаптації екологічного законодавства щодо діяльності у сфері сільського господарства стосовно дотримання вимог «зеленої» економіки. У відповідності із цими зобов'язаннями в Україні прийнято численні законодавчі, підзаконні та нормативні акти щодо впровадження виконання цих зобов'язань.

Амбітні проекти Європейського Союзу із виходу на нульовий рівень викидів вуглекислого газу до 2050 року виглядають дещо далекими від викликів, з якими стикається країна в умовах боротьби за виживання. Це істотно впливатиме на процес впровадження в Україні «зеленого» курсу ЄС (Трещов М., 2025).

Україна взяла на себе зобов'язання щодо імплементації низки директив ЄС у сфері довкілля, зокрема у сферах якості повітря, управління відходами, збереження природи та кліматичної політики, проте реальний прогрес у впровадженні цих норм на сьогодні залишається досить обмеженим, адже ухвалені законодавчі зміни не супроводжуються ефективними механізмами реалізації, а нормативна база залишається фрагментованою та складною для практичного застосування (Трещов М., 2025).

Головною проблемою України на сьогодні є те, що війна яка йде вже п'ятий рік завдає значної шкоди навколишньому середовищу, порушуючи екосистему і залишаючи велику кількість пошкодженої техніки, забруднених водойм, зруйнованих об'єктів інфраструктури і будівель, залишаючи мирних жителів без житла і необхідних засобів існування.

За умов війни продукти харчування, що вирощуються на землях України у багатьох випадках містять токсичні залишки війни, які мстять шкідливі сполуки, що потрапляють до навколишнього середовища внаслідок ведення бойових дій (оксид вуглецю, діоксид азоту, діоксид сірки та суспендовані тверді частинки). За роки війни викиди забруднюючих речовин у повітря значно зросли, що не могло не відбитись на зростанні викидів оксиду вуглецю у повітря, що негативно вплинуло не лише на забруднення навколишнього середовища, а й на стан здоров'я населення. Це також призводить до забруднення стічних вод, що потрапляють у водні об'єкти, орних земель, лісових масивів, повітря та ін.

Українські землі ще довго потребуватимуть звільнення від токсичних залишків війни. За даними Асоціації саперів, вибуховими предметами забруднено майже 82 тисячі кв. км, що складає 15 % загальної площі України. Орієнтовна вартість очищення цієї території 250 млрд. дол., що перевищує річний ВВП України за 2021 рік на 20 %. Повне розмінування країни за прогнозами експертів займе до 70 років (Розмінування потребують майже 83 тисячі кв. км території України – експерти, 2022).

Слід відзначити, що за умов воєнних дій значно скоротилась кількість органічних господарств, і відповідно – обсяги виробленої органічної продукції. А оскільки ринок органічної продукції є експортоорієнтованим, то, відповідно, виробники овочевої продукції та експортери втрачають значну кількість грошових коштів.

Органічне сільське господарство виступає в якості нового альтернативного способу ведення сільського господарства, який дозволяє вирощувати екологічно чисту продукцію, яка сприяє збереженню здоров'я населення та навколишнього середовища, що є важливим в умовах

переходу людства на екологічно чисті технології (Носова Н.І., 2025). Звуженню обсягів вирощування органічних товарів в Україні сприяє обмеження доступу до земельних ресурсів. Значних втрат зазнають об'єкти інфраструктури, складські приміщення та сільгосптехніка.

Останнім часом органічне виробництво набуває все більшої популярності в світі. «Найбільшими органічними виробниками є Індія – 2,4 млн. виробників, Уганда – 0,4 млн. виробників та Ефіопія, Конго, Перу – по 0,1 млн. виробників» (Органічні виробники в світі, 2025).

В Україні війни завдала великої шкоди як сільському господарству в цілому, так і органічному овочівництву, зокрема. Інституційні зміни відносно діяльності овочівництва, зокрема органічного, не сприяли його подальшому розвитку. Майже третина операторів, що виробляли органічну продукцію, зупинили свій бізнес, ще третина суттєво скоротила виробництво, а деякі оператори віддають свою органічну продукцію на підтримку української армії. У цьому випадку бізнес розглядається як найважливіший партнер для досягнення Цілей сталого розвитку. Кожна компанія має можливість долучитися та зробити свій внесок у цей процес, не змінюючи своєї основної діяльності.

Сільськогосподарський сектор у своїй діяльності має орієнтуватись на точне землеробство, сталі практики, екологобезпечне природокористування та органічне виробництво.

В умовах воєнного стану попит на органічну продукцію на внутрішньому ринку зменшився також внаслідок зменшення економічної доступності, яка виникає в результаті зменшення доходів населення а їх платоспроможності. У такому випадку перевага вдається товарам, вартість яких нижче за органічні.

Заходи європейського «зеленого» курсу є дорожньою картою для України щодо повоєнного відновлення земельних, водних та лісових ресурсів та зменшення вуглецевого сліду й викидів у повітря, що негативно впливають на загальний екологічний та кліматичний стан планети.

Ключову роль у декарбонізації промисловості відповідно до європейського «зеленого» курсу відіграє ціноутворення на викиди вуглецю та парникових газів об'єктами промисловості, без якого залишається невирішеним питання про вступ до Євросоюзу.

Заходи, спрямовані Євросоюзом на обмеження імпорту вуглевмісної продукції призведуть до накладання штрафів на виробників, виробництво яких перевищує рівень викидів парникових газів, що може призвести до припинення їх роботи.

Євросоюз визначив подальший курс свого розвитку у напрямку досягнення кліматичної нейтральності у рамках Європейського Зеленого Курсу, використовуючи для цього екологічні стандарти.

Екологізація економіки має здійснюватись у напрямку забезпечення сталого розвитку, для чого необхідно реформувати й гармонізувати економічний, соціальний та екологічний сектори (рис. 1).

Економічний сектор у даному випадку має бути спрямований на інвестиційне і податкове реформування, яке має орієнтуватись на екологобезпечне виробництво.

Соціальний сектор має формувати екологоорієнтований попит. Спрямований на переважне споживання екологічних товарів, які визначає ціна (яка має бути вищою на неекологічні товари). У цьому разі споживання має бути відповідальним.

Екологічна освіта у даному випадку також має інтегрувати «... екологічні знання в освітні програми закладів освіти різних рівнів» (Корольчук Л., 2022).

Інфраструктурні перетворення у соціальній сфері мають спрямовуватись на забезпечення сортування відходів та збирання їх у спеціально відведених місцях.

Ще важливим напрямком соціального сектору є «... «зелена» зайнятість – пошук нових ніш для працевлаштування населення в зелених секторах економіки» (Корольчук Л., 2022).



Рис. 1 Етапи реформування секторів економіки

Перелічені на рис. 1 напрями мають здійснюватись як у короткостроковій перспективі, так і на протязі тривалого часу.

Означені напрямки ощадливого природокористування набувають актуальності для повоєнної розбудови України. Так, у повоєнному відновленні доцільно розвивати сільське господарство у напрямку «зеленої» аграрної політики та дотримуватись системи сталого використання земельних ресурсів для забезпечення збалансованого харчування.

На етапі повоєнного відновлення пріоритетним завданням є видалення завалів, відбудова водопостачання, каналізації та вивезення твердих відходів, яких за цей час накопилось чимало.

Нова модель України у воєнний та повоєнний періоди має передбачати локалізоване відновлення на регіональному рівні, що відповідає Національному плану відновлення, який задає окремих міжнародних параметрів для регіональних планів. Ці плани повинні містити відповідні цілі, механізми та інструменти. Здійснення таких планів можливе за підтримки міжнародних партнерів.

Тут варто звернутись до найкращих світових практик і використовувати ті моделі, які використовує світова спільнота і здійснювати економічний розвиток на засадах екологічної економіки.

Україна має зосередити свої зусилля на отриманні довгострокових економічних та екологічних переваг, замість швидких економічних результатів, які не мають довготривалої дії.

У відповідності із принципом «Build back better», повоєнне відновлення агропродовольчого сектору України має здійснюватись краще, якісніше, ніж було, при цьому необхідно враховувати різноманітні ризики і стратегічно відбудовувати сектор більш стійким та резильєнтним, здатним працювати ефективно. Це надасть можливість відбудови агропродовольчого сектору на якісно новому рівні, з дотриманням вимог сталого економічного розвитку (Носова Н.І., 2025).

Для України важливо на етапі повоєнного відновлення забезпечити національну та продовольчу безпеку, досягти стійкості щоб економіка була резильєнтною та ефективною.

Багато в чому у вирішенні питання повоєнного відновлення може стати в нагоді використання новітніх технологій та штучного інтелекту. Досить успішно його можна використовувати у проведенні робіт з розмінування полів, контролю за ростом рослин і тварин, зрошенням полів, використанням сільськогосподарської техніки та багато іншого.

Підхід до «зеленого» курсу впровадження та дотримання екологічних стандартів, який представлений у вигляді нової моделі екологічно стійкої економіки, має бути дієвим важелем повоєнного відновлення України. Такий підхід вже перетворився на стратегію, яка отримала світову підтримку і стала новим вектором світового розвитку.

1. Трещов М. (2025). Концепція екологізації України в контексті євроінтеграції. Верховенство права: доктрина і практика в умовах сучасних світових викликів. С. 48-51. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (ДДУВС, 23.05.2025) URL: <https://er.dduvs.edu.ua/bitstream/123456789/16418/1/8.pdf>

2. Розмінування потребують майже 83 тисячі кв. км території України – експерти (2022). Укрінформ. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3436411-rozminuvanna-potrebut-majze-83-tisaci-kykm-teritorii-ukraini-eksperti.html>

3. Носова Н.І. (2025). Виклики та перспективи для агробізнесу України в умовах євроінтеграції. Стратегія бізнесу: еко-соціальні євроінтеграційні пріоритети розвитку: Матеріали Міжнар. наук-практ. конф. (5 листопада 2025). Київ. КНЕУ. 2025. С. 68-72. DOI: [doi.org/10.35668/978-966-926-584-5](https://doi.org/10.35668/978-966-926-584-5)

4. Органічні виробники в світі (2025). URL: <https://organicinfo.ua/infographics/world-organic-producers-2025/>

5. Корольчук Л. (2022). Екологізація економіки в контексті реалізації концепції сталого розвитку: теоретичний аспект С. 98-106 Галицький економічний вісник. № 3(76). URL: [https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk\\_tntu\\_2022.03](https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu_2022.03)

6. Носова Н.І. (2025). Повоєнна розбудова агропродовольчого сектору України у векторі дотримання європейського сталого економічного розвитку: можливості і перспективи. Форсайт розбудови України: стратегічні імпульси сталого розвитку в економіці, менеджменті, маркетингу та публічному управлінні: Матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (27 травня 2025). Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного. Запоріжжя С. 69-70. URL: [http://www.tsatu.edu.ua/ep/wp-content/uploads/sites/31/zbirnyk\\_konferencija\\_ostannja\\_versija.pdf](http://www.tsatu.edu.ua/ep/wp-content/uploads/sites/31/zbirnyk_konferencija_ostannja_versija.pdf)

**Олексюк Ганна, Попадинець Назарій**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**

### **СПРАВЕДЛИВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ВУГІЛЬНИХ РЕГІОНІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНО ЗБАЛАНСОВАНОГО ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО РОЗВИТКУ (НА ПРИКЛАДІ ЛЬВІВСЬКОГО МІКРОРЕГІОНУ)**

Сучасні трансформаційні процеси в енергетичному секторі України, зумовлені глобальними екологічними викликами, європейськими інтеграційними орієнтирами та наслідками воєнної агресії, актуалізують необхідність переходу від ресурсно-орієнтованої моделі розвитку до інноваційно-екологічної. У цьому контексті особливого значення набуває концепція справедливої трансформації вугільних регіонів, яка передбачає комплексне поєднання економічних, соціальних та екологічних компонентів розвитку територій.

Вугільні регіони України, зокрема мікрорегіон Львівської області, тривалий час функціонували як складні виробничо-господарські системи, базовані на підземному видобутку кам'яного вугілля та функціонуванні енергетичних підприємств. Така модель забезпечувала соціально-економічний розвиток територій, однак супроводжувалася значним антропогенним навантаженням на довкілля, що проявляється у забрудненні атмосферного повітря, деградації ґрунтів, порушенні гідрологічного режиму та накопиченні промислових відходів. У сучасних умовах, коли спостерігається вичерпання невідновлюваних ресурсів, зниження обсягів вуглевидобутку та руйнування енергетичної інфраструктури, постає об'єктивна необхідність структурної перебудови регіональної економіки.

Формування нової енергетичної парадигми в Україні базується на трьох взаємопов'язаних напрямках: поступове згортання вуглевидобувної галузі, розвиток альтернативних джерел енергії та відновлення енергетичної інфраструктури. Синергетична взаємодія цих процесів формує нову модель енергетичного ринку, що характеризується підвищеною динамічністю та залежністю від зовнішніх і внутрішніх факторів. При цьому особливого значення набуває регіональний рівень управління, де відбувається практична реалізація політики енергетичного переходу та адаптації територій до нових умов функціонування.

Важливим інструментом забезпечення трансформаційних процесів є державна політика, закріплена у стратегічних та програмних документах, спрямованих на досягнення кліматичної нейтральності та сталого розвитку. Зокрема, Державна цільова програма справедливої трансформації вугільних регіонів визначає комплекс заходів щодо диверсифікації економіки, підвищення енергоефективності, розвитку людського капіталу та мінімізації екологічних ризиків.

На регіональному рівні ключову роль відіграє План дій зі справедливої трансформації вугільного мікрорегіону Львівщини до 2030 року, який передбачає реалізацію низки інвестиційних проєктів у сфері відновлювальної енергетики, екологічної реабілітації територій та розвитку інфраструктури. Серед них особливе місце займають проєкти будівництва вітрових та сонячних електростанцій, створення енергетичних кластерів, розвиток біоенергетики та впровадження систем моніторингу стану довкілля [1]. Реалізація таких проєктів сприяє не лише диверсифікації джерел енергії, але й формуванню нових економічних можливостей для територіальних громад.

Разом із тим, розвиток відновлювальної енергетики супроводжується появою нових екологічних викликів, пов'язаних із виробництвом, експлуатацією та утилізацією обладнання. Зокрема, використання сонячних панелей, вітроенергетичних установок та акумуляторних систем потребує впровадження ефективних механізмів поводження з відходами та запобігання негативному впливу на довкілля. Таким чином, екологічна ефективність «зеленої» енергетики визначається не лише рівнем зменшення викидів, але й здатністю забезпечити повний життєвий цикл технологій без шкоди для навколишнього середовища.

Особливу увагу слід приділити просторовим та інфраструктурним аспектам розміщення об'єктів відновлювальної енергетики. Вибір локацій для будівництва вітрових та сонячних електростанцій має враховувати природно-кліматичні умови, наявність енергетичних мереж, екологічні обмеження та соціальні фактори. Це потребує застосування сучасних методів аналізу, включаючи геоінформаційні системи, моделювання та прогнозування, що дозволяють оцінити потенційні ризики та ефективність інвестиційних рішень.

Важливим компонентом справедливої трансформації є також соціальний аспект, який передбачає адаптацію населення до нових умов економічної діяльності, створення нових робочих місць та розвиток освітніх програм у сфері відновлювальної енергетики. Прикладом є створення навчальних центрів для підготовки фахівців у галузі «зеленої» енергетики, що забезпечує формування кадрового потенціалу для реалізації інноваційних проєктів.

Значний потенціал підвищення ефективності трансформаційних процесів пов'язаний із використанням сучасних інформаційних технологій. Запровадження систем онлайн-моніторингу стану довкілля, аналізу великих даних та цифрових платформ управління дозволяє

забезпечити оперативне реагування на екологічні загрози, підвищити прозорість управлінських рішень та оптимізувати використання ресурсів [2]. Такий підхід формує основу для переходу до цифрової моделі екологічного управління, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку.

Таким чином, справедлива трансформація вугільних регіонів виступає комплексним механізмом структурної перебудови економіки, спрямованим на забезпечення екологічної безпеки, енергетичної стійкості та соціально-економічного розвитку територій. Її реалізація потребує інтеграції державної політики, регіональних стратегій, інвестиційних ресурсів та інноваційних технологій. В умовах сучасних викликів, зокрема воєнного стану та необхідності післявоєнного відновлення, зазначений підхід набуває особливої актуальності та може стати основою формування конкурентоспроможної та екологічно орієнтованої економіки України.

1. Олексюк, Г. В., & Попадинець, Н. М. (2023). Від реструктуризації вугільної галузі до справедливої трансформації вугільних регіонів: досвід і перспективи. *Економіка України*, 9 (742),30-54.

2. Чижевська, Л., Ковальчук, С., Чижевський, Т., & Качаровський, Р. (2024). Практичні аспекти визначення вітроенергетичного потенціалу території. *Суспільно-географічні чинники розвитку регіонів : матеріали IX Міжнар. наук.-практ. інтернет-конференції*. 284 с.

**Пелешак Олег**

*Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка*

### **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СИСТЕМІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ САНАЦІЇ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ ЕКОНОМІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ**

У сучасних умовах трансформації національної економіки, посилення кризових явищ, воєнних викликів та нестабільності глобального економічного середовища проблема забезпечення ефективної санації підприємств набуває особливої актуальності. Погіршення фінансового стану суб'єктів господарювання, порушення логістичних ланцюгів, дефіцит інвестиційних ресурсів, зростання енергетичних витрат та підвищення екологічних ризиків суттєво ускладнюють функціонування підприємств у різних секторах економіки. У цих умовах формування дієвого організаційно-економічного механізму санації підприємств повинно базуватися на інтеграції сучасних інформаційних технологій, цифрових платформ управління та інструментів аналітичного забезпечення прийняття управлінських рішень. Саме цифровізація виступає одним із ключових чинників підвищення адаптивності підприємств до кризових процесів і забезпечення їх економічної стійкості в умовах ризикового розвитку національної економіки.

Особливого значення набуває використання інформаційних технологій у системі антикризового фінансового управління підприємствами. Використання цифрових систем управління ресурсами підприємства (ERP), автоматизованих платформ фінансового аналізу, Big Data та технологій штучного інтелекту дозволяє забезпечити оперативне оцінювання фінансового стану підприємств, прогнозування ризиків неплатоспроможності та формування ефективних сценаріїв санаційного управління. Інформаційні системи дають змогу здійснювати комплексний аналіз ліквідності, рентабельності, структури витрат і рівня фінансової стійкості підприємств у режимі реального часу, що значно підвищує ефективність антикризових рішень. У сучасних умовах цифрові технології стають важливим інструментом формування системи раннього попередження кризових явищ та забезпечення безперервності функціонування підприємств.

Водночас інформаційні технології відіграють важливу роль у забезпеченні екологічної безпеки діяльності підприємств та впровадженні принципів сталого розвитку у систему санаційного управління. Використання цифрових систем екологічного моніторингу, автоматизованих платформ контролю виробничих процесів, технологій Інтернету речей (IoT) та систем енергетичного менеджменту дозволяє підприємствам здійснювати контроль за рівнем використання ресурсів, оптимізувати енергоспоживання та мінімізувати негативний вплив на довкілля. Особливого значення набуває впровадження екологічно орієнтованих цифрових технологій у виробничі процеси, що сприяє скороченню викидів забруднюючих речовин, підвищенню енергоефективності та реалізації концепції "зеленої" трансформації підприємств.

У системі організаційно-економічного забезпечення санації підприємств цифровізація сприяє оптимізації управлінських процесів та підвищенню ефективності взаємодії між усіма учасниками санаційного процесу. Використання електронного документообігу, цифрових платформ комунікації з кредиторами, систем управління ризиками та інформаційно-аналітичних сервісів дозволяє забезпечити прозорість прийняття рішень, скоротити часові витрати на реалізацію санаційних заходів та підвищити рівень координації управлінських процесів [1]. Крім того, цифрові платформи створюють передумови для формування інтегрованого інформаційного середовища підприємства, у межах якого забезпечується синхронізація фінансових, виробничих, екологічних та логістичних процесів.

Особливого значення набуває використання інформаційних технологій у процесі оцінювання ризиків діяльності підприємств. У сучасних умовах ризиковість функціонування бізнесу визначається не лише економічними факторами, але й екологічними, соціальними та кібернетичними загрозами. Використання цифрових інструментів моделювання ризиків, аналітичних платформ прогнозування та систем автоматизованого аналізу даних дозволяє підприємствам оцінювати рівень впливу зовнішніх і внутрішніх ризиків на результати господарської діяльності. Це забезпечує можливість формування адаптивних стратегій санації та підвищення рівня економічної безпеки підприємств у довгостроковій перспективі.

На рівні державної економічної політики важливим завданням є створення інституційного середовища, яке сприятиме цифровій трансформації антикризового управління підприємствами. Це передбачає розвиток цифрової інфраструктури, підтримку інноваційних технологій, удосконалення нормативно-правового забезпечення цифровізації економіки та формування системи стимулювання екологічної модернізації підприємств. Особливого значення набуває інтеграція інформаційних технологій у державні механізми підтримки підприємств, реалізація програм цифрової трансформації бізнесу та розвиток механізмів державно-приватного партнерства у сфері впровадження інноваційних антикризових рішень [2].

У сучасних умовах важливою складовою санації підприємств є забезпечення інформаційної безпеки та захисту цифрової інфраструктури. Зростання рівня кіберзагроз, ризиків втрати інформації та порушення функціонування інформаційних систем потребує впровадження сучасних механізмів кіберзахисту, багаторівневої автентифікації та цифрового контролю доступу до даних [3]. Надійність інформаційної інфраструктури є важливою умовою забезпечення стійкості підприємств до кризових явищ та ефективності функціонування цифрових систем управління.

Отже, інформаційні технології є невід'ємною складовою організаційно-економічного механізму забезпечення санації підприємств у ризикових умовах розвитку національної економіки. Їх використання сприяє підвищенню ефективності антикризового управління, забезпеченню фінансової стабільності, оптимізації використання ресурсів та мінімізації екологічних ризиків. Інтеграція цифрових технологій у систему санації підприємств створює передумови для формування адаптивної моделі управління, орієнтованої на принципи сталого розвитку, екологічної безпеки та інноваційної трансформації економіки. У сучасних умовах цифровізація антикризового управління стає одним із ключових чинників забезпечення конкурентоспроможності підприємств та відновлення економічної стійкості держави.

1. Ляшенко, О.М. (2015). *Концептуалізація управління економічною безпекою підприємства*: монографія. К.: НІСД.
2. Реверчук, Н.Й. (2004). *Управління економічною безпекою підприємницьких структур*. Львів: ЛБІ НБУ.
3. Кравченко, О., Гаврилюк, О., Челомбітько, О., & Бойко, С. (2024). Управління економічною безпекою підприємств в умовах цифрової економіки. *Адаптивне управління: теорія і практика. Серія Економіка*, 19(38). [https://doi.org/10.33296/2707-0654-19\(38\)-12](https://doi.org/10.33296/2707-0654-19(38)-12).

**Рябоконт Альона, Новак Олена**  
*Державний торговельно-економічний університет*

### **ВПЛИВ МІЖНАРОДНИХ БІЗНЕС-ІНСТИТУЦІЙ НА ЕКОЛОГІЗАЦІЮ ПІДПРИЄМНИЦТВА В КРАЇНАХ ЄС: ДОСВІД МІЖНАРОДНОЇ ТОРГОВОЇ ПАЛАТИ**

Реалізуючи найбільш масштабну екологічну стратегію в сучасному світі, Європейський Союз фактично задає глобальні тренди регулювання, стандартів та кон'юнктурних очікувань ринку. Підприємства, які працюють на єдиному ринку ЄС або постачають продукцію до Європи, змушені перебудовувати свої бізнес-моделі, ланцюги постачань, виробничі процеси та систему звітності. Крім загальноєвропейських ініціатив, кожна держава-член розробила національні плани з енергетики та клімату (NECP) [1] і довгострокові стратегії розвитку згідно з Паризькою угодою [2]. Це дозволило імплементувати стратегічні орієнтири ЄС із урахуванням специфіки національних економік та наявного ресурсного потенціалу кожної країни. Практична реалізація кліматичної політики в країнах ЄС базується на впровадженні комплексних стратегічних актів. Зокрема, німецький «Кліматичний закон» із горизонтом планування до 2045 року [3], Національний енергетичний та кліматичний план Франції [1] та іспанський Інтегрований план з енергетики та клімату [4] формують інституційну основу для декарбонізації. Ці нормативні документи не лише регламентують цільові показники скорочення обсягів викидів парникових газів, а й створюють правові передумови для технологічної модернізації, забезпечуючи конкурентоздатність національних виробників. Міжнародні торговельні палати (МТП), галузеві асоціації та інші бізнес-організації відіграють ключову роль посередників: вони допомагають компаніям перекладати складні європейські регуляції на мову конкретних бізнес-рішень, забезпечують конструктивний діалог між владою та бізнесом, захищають інтереси підприємств під час розробки нових норм і сприяють практичній реалізації «зеленої» трансформації без втрати конкурентоспроможності.

Міжнародні бізнес-інституції, зокрема ІСС, традиційно виступають як посередники між бізнесом та урядами у розробці і впровадженні екологічних стандартів. ІСС була одним із піонерів індустріальної саморегуляції у сфері екології, вже у 1991 р. прийнявши Бізнес-хартію зі сталого розвитку [5]. Згідно з дослідженнями, саме ІСС відіграла ключову роль у трансформації бізнес-середовища, що зрештою зумовило становлення концепції сталого розвитку. Організація фактично адаптувала екологічний порядок денний до реалій приватного сектору, обґрунтувавши можливість гармонійного поєднання ринкової експансії з принципами

відповідального природокористування. У практиці ІСС утворена Комісія з довкілля і енергії, яка формує позиції бізнесу для глобальних форумів (ООН, Парижська угода) [6]. Виконуючи функції офіційного представника ділових кіл у робочих органах UNFCCC, ІСС просуває ідею синергетичного поєднання бізнес-інтересів та екологічних стандартів, позиціонуючи «зелену» трансформацію не як фінансове обтяження, а як чинник забезпечення економічної рентабельності та стимулювання ринку праці.

У цій ролі міжнародні бізнес-об'єднання активно просувають підтримку корпоративних інновацій, циркулярної економіки, а також сприяють розробці стандартів сталості [6]. МТП регулярно формує та оновлює добровільні кодекси й принципи, які стають орієнтиром для компаній усього світу. Нижче наведені ключові приклади ініціатив ІСС (включно з національними комітетами) в ЄС:

— У 2018 в Польщі (Катовіце) ІСС організувала «Talanoa Dialogue Workshop» - семінар для обговорення проблем кліматичних змін за участі представників урядів, експертів і бізнесу [7]. Метою семінару було інтегрувати бізнес-пропозиції до національних кліматичних планів та збільшити роль приватного сектору у кліматичних ініціативах. За результатами семінару було сформульовано рекомендації щодо поглиблення міжсекторальної взаємодії між приватним сектором та державними інституціями, де активність приватного капіталу виступає потужним стимулом для прискорення енергетичного переходу. Проте критичною проблемою залишається різний рівень готовності бізнесу до кліматичних трансформацій, потреба у чіткіших механізмах залучення.

— За ініціативи ІСС Germany, у партнерстві з ЄЕК ООН та Європейською Комісією, у жовтні 2024 року було проведено Сталий фінансовий форум у рамках Гамбурської конференції сталого розвитку з метою залучення фінансів у «зелені» проєкти [8]. Особливу увагу приділено підтримці проєктів зокрема, у сферах виробництва акумуляторів та геліоенергетики через механізм приватно-державного партнерства. Результати діяльності форуму на конференції не лише забезпечили проєктам міжнародну підтримку, а й продемонстрували ефективність синергії державного, галузевого та фінансового секторів. Водночас, попри залучення фінансування обсягом близько 1,9 млрд дол. США, стратегічним викликом залишається подолання інвестиційного дефіциту та формування цілісної правової бази для «зелених» технологій.

— Запропонована Європейською Комісією ініціатива щодо протидії недобросовісним екологічним заявам (Green Claims Directive) [9] викликала дискусію щодо ризиків бюрократизації діяльності суб'єктів господарювання. Позиція ІСС ґрунтувалася на необхідності збалансованого підходу: забезпеченні достовірності екомаркування при одночасному недопущенні надмірного регуляторного тиску на сектор МСП. Внаслідок активної участі бізнес-інституцій у публічних консультаціях, у червні 2025 року Директиву було відкликано з розгляду. Сучасний етап переговорів спрямований на подолання методологічного вакууму у сфері верифікації екологічних показників, що є критично важливим для створення прозорих правил ринку.

— Напередодні переходу до постійної фази транскордонного вуглецевого коригування з 01.01.2026 р., ІСС ініціювала запит до Європейської Комісії щодо розробки чіткого методичного інструментарію [10]. Основну увагу було приділено дев'яти стратегічним напрямкам, зокрема верифікації вуглецевого сліду, узгодженню з системою ETS та встановленню преференційних порогів для МСП. Експертна участь ІСС забезпечила зобов'язання Європейської Комісії щодо завчасного оприлюднення регуляторних настанов, що сприятиме адаптації бізнесу до нових екологічних вимог.

— ІСС виступає ключовим суб'єктом розробки «Принципів сталого торговельного та фінансового права», спрямованих на гармонізацію правового поля у сфері декарбонізації [5]. Через партнерство з компанією Sage, організація забезпечує мобілізацію кліматичних інвестицій, трансформуючи аналітичні дані у дієві механізми підтримки малого та середнього бізнесу. Діяльність ІСС фокусується на усуненні регуляторних перешкод, що перешкоджають інтеграції приватного сектору в глобальну «зелену економіку».

Отже, Міжнародна торгова палата (ІСС) та аналогічні об'єднання трансформувалися з пасивних спостерігачів на ключових суб'єктів, які активно сприяють «зеленому» переходу. ІСС поєднує бізнес-інтереси із екологічними вимогами, формує міждержавні діалоги та надає технологічну експертизу, забезпечує інклюзивність процесу законотворення. Роль ІСС як офіційного представника ділових кіл у структурах UNFCCC дозволяє збалансувати екологічні вимоги проєктів з економічною доцільністю, запобігаючи перетворенню екологічної політики на надмірний фінансовий тягар для приватного сектору. Успіх цих проєктів обумовлений широким охопленням і залученням усіх зацікавлених сторін. Для України важливо скористатися здобутками міжнародних бізнес-об'єднань, впровадити концепції сталого розвитку і активніше комунікувати з бізнесом щодо екологічних стандартів.

1. Міністерство Економіки України. (n.d.). *Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року*. Retrieved April 17, 2026, from <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku>
2. Верховна Рада України. (n.d.). *Парижська угода (995\_161)*. Retrieved April 17, 2026, from [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_161](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161)
3. European Parliament. (2024). *EU climate policy overview*. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/767182/EPRS\\_BRI\(2024\)767182\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/767182/EPRS_BRI(2024)767182_EN.pdf)
4. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (n.d.). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2023–2030*. Retrieved April 17, 2026, from <https://www.miteco.gob.es/es/energia/estrategia-normativa/pniec-23-30.html>
5. International Chamber of Commerce. (2015). *ICC business charter for sustainable development*. <https://iccwbo.org/news-publications/policies-reports/icc-business-charter-for-sustainable-development-2015/>
6. International Chamber of Commerce. (n.d.). *Environment and sustainability*. Retrieved April 17, 2026, from <https://iccwbo.org/global-insights/environment-and-sustainability/>
7. United Nations Framework Convention on Climate Change. (n.d.). *ICC convenes Talanoa workshop on climate ambition*. Retrieved April 21, 2026, from <https://unfccc.int/news/icc-convenes-talanoa-workshop-on-climate-ambition>
8. ICC Germany. (n.d.). *Time to deliver: Regional action to bridge the climate investment divide*. Retrieved April 18, 2026, from <https://www.iccgermany.de/magazin-post/time-to-deliver-regional-action-to-bridge-the-climate-investment-divide/>
9. ICC Netherlands. (n.d.). *European Commission withdraws Green Claims Directive – ICC welcomes opportunity for constructive recalibration*. Retrieved April 18, 2026, from <https://www.iccwbo.nl/news/european-commission-withdraws-green-claims-directive-%E2%80%94-icc-welcomes-opportunity-for-constructive-recalibration>
10. International Chamber of Commerce. (n.d.). *Business calls for urgent clarity on EU's carbon border adjustment mechanism ahead of January implementation*. Retrieved April 18, 2026, from <https://iccwbo.org/news-publications/news/business-calls-for-urgent-clarity-on-eus-carbon-border-adjustment-mechanism-ahead-of-january-implementation/>

## **FINANCIAL SUPPORT FOR THE ECOLOGIZATION OF THE ECONOMIES OF UKRAINE'S REGIONS AS A FACTOR IN SHAPING A "GREEN" FUTURE FOR THE COUNTRIES OF THE EUROPEAN UNION**

Contemporary research in the fields of public finance and corporate finance increasingly views the green economy as a central driver of regional development, linking the greening of economic activity to the financial capacity of regions. In this context, the financial support for the environmental transformation of local communities and the financial stability of green sector enterprises should not be viewed in isolation, but rather as complementary economic categories that form a unified system of green regional development in the context of integration with European Union standards [5].

In the scientific literature, the financial support for the ecological transformation of local communities is interpreted as the totality of financial resources mobilized within local budgets, intergovernmental transfers, and other sources directed toward the implementation of environmental programs, infrastructure modernization, the adoption of low-carbon technologies, and the attraction of private investment in "green" projects. In this sense, green financing serves as the institutional foundation for shaping the region's environmentally oriented economic environment, aimed at building a green future in line with the strategic goals of the European Green Deal [3].

From a corporate finance perspective, the financial stability of green sector enterprises is viewed as the ability of business entities to ensure environmentally safe, economically efficient, and socially responsible operations; to maintain solvency; to sustain an optimal structure of "green" capital; and to generate stable financial results amid changes in the climate and regulatory environment. Traditionally, such stability is assessed through indicators of liquidity, financial independence, profitability, and business activity; however, in the context of greening, these indicators are supplemented by environmental performance indices, the share of expenditures on environmental investments, and emission levels.

An important exogenous factor influencing the financial stability of "green" enterprises is the level of financial capacity of localities. First, the growth of local budget revenues creates the conditions for financing environmental infrastructure projects (treatment facilities, renewable energy equipment, and the modernization of public transport), which reduces businesses' environmental transaction costs. Second, spending on environmental activities stimulates the development of eco-oriented entrepreneurship and attracts investment in low-carbon technologies and green jobs. Third, the concentration of environmental capital investments in a region creates a multiplier effect, which is reflected in the increased economic performance of enterprises that adhere to environmental standards.

Thus, the financial support for environmental transformations in local communities can be viewed as a macroeconomic prerequisite for building the financial stability of green sector enterprises, while the effectiveness of environmentally oriented entrepreneurship, in turn, influences the region's tax base and level of fiscal capacity. This indicates the existence of a feedback loop between environmentally oriented public and corporate finances and reflects the specific nature of the green economy.

Within the scope of this study, the financial support for environmental transformations in local communities is interpreted as an integrated indicator of the region's fiscal capacity and environmentally oriented investment activity, while the financial stability of enterprises is viewed as a comprehensive measure of their economic performance, taking into account indicators of environmental safety, energy efficiency, and the share of environmental investments. This allows for a

shift from a purely theoretical understanding of these categories to their quantitative assessment within the framework of regional analysis, with an emphasis on the greening of the economy.

An empirical analysis of the financial support for environmental transformations in local communities at the regional level should begin with an assessment of green fiscal capacity and local environmental policy priorities. Within the scope of this study, the following basic indicators have been identified:

- local budget revenues excluding transfers per capita;
- local budget expenditures on environmental and economic activities aimed at modernizing environmental protection infrastructure, introducing energy-efficient technologies, and attracting private investment in green projects.

An empirical analysis of the financial support for environmental transformations in local communities at the regional level should begin with an assessment of green fiscal capacity and local environmental policy priorities. Within the scope of this study, the following basic indicators have been identified:

- local budget revenues excluding transfers per capita;
- local budget expenditures on environmental and economic activities aimed at modernizing environmental protection infrastructure, introducing energy-efficient technologies, and attracting private investment in green projects.

The regional distribution of growth rates in local budget revenues excluding transfers for 2018–2024 reflects a marked differentiation in the “green” financial dynamics of territorial communities. Regions with high growth rates (over 110%) include Lviv, Ternopil, Volyn, and Chernivtsi Oblasts, indicating active expansion of their own revenue base, including through environmentally oriented projects, energy efficiency, and renewable energy. The middle group of regions (80–110% growth) encompasses most of Ukraine’s regions, which are characterized by moderate but stable growth in “green” fiscal capacity. At the same time, a number of regions demonstrate growth rates below 80%, indicating limited opportunities to expand local governments’ financial resources to support environmental transformations and green economic activity. The results confirm the existence of asymmetry in the “green” financial capacity of regions and provide a basis for analyzing its impact on the financial stability of enterprises that adhere to environmental standards.

The next stage of the study involves assessing indicators that characterize the environmentally oriented financial stability of enterprises in Ukraine’s regions. Taking into account the chosen methodology, this assessment is based on an analysis of: the volume of environmentally acceptable goods and services sold, the level of green employment, environmental capital investments, and the share of enterprises that are innovative and environmentally active. These indicators allow for a shift from the traditional assessment of financial stability to an assessment of enterprises’ “green” performance and their ability to meet the requirements of the greening of the economy.

The volume of products sold serves as an integral indicator of the economic performance of the business sector, particularly enterprises that implement low-carbon technologies, energy-efficient solutions, and environmentally safe technologies. In 2018–2024, most regions saw growth in this indicator, particularly in those areas where environmentally oriented investments and green innovations are concentrated. At the same time, fluctuations are recorded in 2022–2023 due to military risks, disruptions in logistics chains, and the redistribution of production capacities among regions, which also affects the pace of green transformation.

The level of green employment in economic entities reflects the regional economy’s ability to create an environmentally oriented workforce. After 2022, most regions will see a gradual stabilization of this indicator, reflecting the business sector’s adaptive mechanisms and a certain transformation of the employment structure toward low-carbon and environmentally friendly sectors. Capital environmental investments (in renewable energy, modernization of municipal infrastructure, energy

efficiency, waste processing, etc.) play a key role in ensuring the long-term financial sustainability of enterprises. Their regional concentration in industrially developed regions exacerbates the disparity in opportunities for implementing green projects across regions.

Innovative activity by enterprises focused on green technologies increases the flexibility of the business environment, reduces environmental risk, and contributes to greater competitiveness. In certain groups of regions, this enables more resilient economic performance, particularly in the face of external shocks, such as military and logistical constraints. Thus, a structural dynamic analysis indicates a potential link between the “green” fiscal capacity of local communities and the financial stability of environmentally oriented enterprises. To quantitatively measure the strength and direction of this influence, it is advisable to apply a panel econometric approach.

Thus, the findings of this study indicate that the green financial support provided to local communities is a key factor in fostering environmentally oriented financial stability among enterprises in Ukraine’s regions. The level of “green” fiscal capacity, defined by local budget revenues excluding transfers and expenditures on environmental and economic activities, varies significantly across regions, creating an asymmetry in the starting conditions for implementing environmental transformations and attracting green investments. Particularly high revenue growth rates have been recorded in Lviv, Ternopil, Volyn, and Chernivtsi regions, where financial resources are being actively expanded to support energy efficiency, renewable energy, and other areas of the green economy.

An analysis of environmentally oriented indicators in the business sector (volume of environmentally acceptable goods and services sold, level of green employment, environmental capital investments, and the share of innovation-driven, environmentally active enterprises) indicates a close link between the “green” fiscal capacity of regions and the economic and environmental performance of businesses. Environmental capital investments play the most significant role in ensuring the long-term financial stability of enterprises, creating a multiplier effect for sales growth and increased competitiveness, particularly in the face of external shocks.

Thus, the study confirms the interdependence of green public and corporate finance, namely: increasing the fiscal-environmental capacity of regions contributes to the growth of financial performance of environmentally oriented enterprises, which, in turn, enrich the tax base and strengthen the fiscal capacity of regions. This creates the foundation for the formation of a differentiated regional financial policy aimed at supporting environmental investments, green employment, and innovative, environmentally active businesses, which is strategically important for the greening of Ukraine’s economy and its integration into the European Union’s green development standards.

1. Agres, O. G., Sadura, O. B., Popadynets, N. M., & Semchuk, R. B. (2024). Financial and credit instruments for financing local economic development. *Regional Economics*. No. 4(114). pp. 89–99. URL: DOI: <https://doi.org/10.36818/1562-0905-2024-4-9>

2. Burik Z. The financial capacity of territorial communities as an indicator of decentralization effectiveness and a component of the region’s socio-economic development. *Public Administration: Concepts, Paradigm, Development, Improvement*, (13). 2025. pp. 6–17. URL: <https://doi.org/10.31470/2786-6246-2025-13-6-17/>

3. The European Green Deal and the potential consequences of its implementation by neighboring countries for Ukraine - Prism UA. Prism UA. URL: [https://prismua.org/green\\_deal\\_1/](https://prismua.org/green_deal_1/)

4. Zhiltsov, M. O. (2025). Investment attractiveness of Ukraine’s regions in the context of decentralization and economic recovery. *Economic Achievements: Prospects and Innovations*. (19). URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15718184>

5. Skorokhod, I. S., Gorbach, L. M. (2019). Development of the green economy in European Union countries. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Tavria National University. Series: Economics and Management*, (30 (69), No. 2), pp. 17–21.

6. Stepanenko, O., Kanel'ska, A. (2024). Financial stability of enterprises during martial law: risks, threats, and ways to overcome them. *Entrepreneurship and Innovation*. (33). pp. 123–130. URL: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/33.21>

**Сиса Владислав, Яковенко Євгенія**  
*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВБУДОВАНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДЕГРАДАЦІЇ МЕМБРАНИ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ ЯК ПЕРЕДУМОВА ЗМЕНШЕННЯ ОБСЯГУ ВІДХОДІВ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Враховуючи погіршення якості трубопровідної води, побутові системи фільтрації, які працюють за технологією зворотного осмосу, набули широкого поширення. Основним змінним елементом таких систем є мембрана зворотного осмосу, яка за час експлуатації втрачає свої селективні властивості. В більшості побутових систем заміна мембран відбувається згідно регламенту виробника без урахування фактичного її стану. Як наслідок, мембрану або передчасно утилізують, або використовують забруднену, що негативно впливає на якість води.

Цього можна уникнути шляхом переходу від регламентної до прогнозованої заміни мембрани, використовуючи безперервний моніторинг параметрів води. Це дозволить зменшити полімерні відходи та продовжить середній термін експлуатації побутових мембран [1]. Такий підхід відповідає базовим принципам циркулярної економіки, а також цілям European Green Deal щодо продовження життєвого циклу побутових пристроїв та зменшення кількості непереробних відходів. Для реалізації такого підходу у побутових умовах потрібно інтегрувати локальний автономний аналіз моделі машинного навчання у вбудований мікроконтролер, без постійного підключення до хмарних сервісів. Такий підхід відповідає сучасній концепції TinyML [2,3] та дозволяє робити кроки в сторону екологізації побутової техніки.

У попередній роботі було проаналізовано основні класи моделей машинного навчання [4], які використовують для оцінювання якості води з точки зору теоретичних характеристик. Оскільки теоретичні параметри підтверджують доцільність використання машинного навчання для оцінки якості води, варто експериментально оцінити можливість реалізувати такі моделі на апаратних платформах з малим ресурсом потужності. Цей аспекти є важливим для подальшої розробки модуля для моніторингу деградації мембрани.

Метою дослідження є експериментальна оцінка експорту моделей машинного навчання, придатних для класифікації якості питної води, на платформу ESP32 із збереженням точності класифікації та порівняння інструментів автоматичної генерації коду C/C++ для embedded-розгортання.

Для експерименту було використано відкритий набір даних Water Potability[5]. Він містить 3276 зразків з дев'ятьма фізико-хімічними параметрами води та бінарною цільовою змінною придатності води для споживання. В цій вибірці розподіл класів придатної та непридатної води є помірно незбалансованим (придатних зразків – 39,01%, непридатних – 60,99%). Дані поділені на тренувальну, валідаційну та тестову групи у співвідношенні 70/15/15 із застосуванням random\_state=42. Налаштування підготовки даних проводилося лише на тренувальній частині, щоб уникнути помилок у прогнозах. Оптимальні параметри моделей підбиралися шляхом багаторазового тестування на різних фрагментах. Розглянуто п'ять моделей: Random Forest, XGBoost, метод опорних векторів (SVM) з радіально-базисним ядром, k-наближених сусідів та багатошаровий перетин (MLP). Для атоматизації генерації коду C/C++ застосовано бібліотека micromlgen та m2cgen. Розмір згенерованого коду оцінювався у кілобайтах та порівнювався з обмеженням flash-пам'яті ESP32 4096 кБ.

Результати експерименту експорту моделей показано в табл.1.

Таблиця 1. Результати експорту моделей машинного навчання на ESP32

| Модель                    | Бібліотека | Точність | Розмір, кБ | Час інференсу, мс | Сумісність з ESP32 |
|---------------------------|------------|----------|------------|-------------------|--------------------|
| Random Forest             | micromlgen | 0,679    | 17411      | 0,094             | не вміщується      |
| Random Forest (компактна) | micromlgen | 0,648    | 577        | 0,03              | вміщується         |
| SVM (gamma=0,111)         | micromlgen | 0,677    | 429        | 0,06              | вміщується         |
| XGBoost                   | m2cgen     | 0,646    | 279        | 0,007             | вміщується         |
| MLP                       | m2cgen     | -        | -          | -                 | не підтримується   |

Встановлено, що Random Forest з оптимальними гіперпараметрами генерує С-код розміром 17411 кБ, що перевищує об'єм пам'яті ESP32. Це робить неможливим використати цю модель у фізичному пристрої. Зниження кількості дерев до 30 та встановлення обмеження глибини дозволило отримати скорочену модель Random Forest розміром 577кБ, але цей крок зменшив точність цієї моделі. Для експорту XGBoost застосовано параметр  $\text{base\_score}=0.5$ , оскільки при використанні параметрів по замовчуванню виникає помилка. Для експорту SVM застосовано розрахований параметр  $\text{gamma}=1/(\text{n} \cdot \text{Var}(X))$  для дев'яти ознак досліджуваного набору даних. MLP не підтримується застосованими бібліотеками, для нього варто використати TensorFlow Lite for Microcontrollers.

За сукупністю критеріїв як базову модель для першої обробки даних обрано SVM. Вона демонструє хорошу точність та не займає весь об'єм flash-пам'яті мікроконтролера. Важливо відзначити, що ця модель не зазнає втрат в точності при експорті коду. Очікувана точність для тестового макету на платформі ESP32 буде становити приблизно 0,65-0,67 при використанні float 32

Виконане дослідження показує технологічну можливість реалізації моделі машинного навчання для класифікації параметрів води на мікроконтролерах малої потужності. Модель SVM розглядається як перший рівень класифікації параметрів води, який працює у реальному часі. На другому рівні планується застосувати нейронну мережу LSTM для виявлення закономірностей деградації мембрани на основі часових послідовностей власних вимірювань. Разом такий підхід дозволить впровадити систему прогнозованого обслуговування мембран зворотного осмосу у побутових системах. Таким чином, можна розглядати можливість переходу від регламентного обслуговування до фактичної заміни фільтруючого елементу. Як наслідок, збільшиться експлуатаційний час системи фільтрації та зменшиться кількість полімерних відходів.

1. Karimanzira, D., & Rauschenbach, T. (2021). Performance prediction of a reverse osmosis desalination system using machine learning. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9(7), 46–61. <https://doi.org/10.4236/gep.2021.97004>

2. Ray, P. P. (2022). A review on TinyML: State-of-the-art and prospects. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 34(4), 1595–1623. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.11.019>

3. Sanchez-Iborra, R., & Skarmeta, A. F. (2020). TinyML-enabled frugal smart objects: Challenges and opportunities. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 20(3), 4–18. <https://doi.org/10.1109/MCAS.2020.3005467>

4. Сиса, В. О., & Яковенко, Є. І. (2025). Аналіз моделей штучного інтелекту для використання у сфері оцінювання якості води. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*, 1(09), 56-62. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-01-09-06>

5. Kadiwal, A. (2021). *Water Quality Dataset*. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/adityakadiwal/water-potability>

## АДАПТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ВІДТВОРЕННЯ ЛЮДСЬКОГО КАПІТАЛУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

У сучасних умовах повоєнного відновлення України проблема відтворення людського капіталу територіальних громад набуває особливої наукової та практичної актуальності. Людський капітал дедалі більше розглядається не лише як сукупність знань, навичок, професійних компетентностей і здоров'я населення, а як базовий ресурс стійкості громади, її здатності до економічного відновлення, соціальної інтеграції, інноваційного розвитку та довгострокової конкурентоспроможності. Саме на рівні територіальної громади відбувається практичне поєднання життєвого циклу людини з локальними політиками розвитку, оскільки тут взаємодіють органи місцевого самоврядування, заклади освіти, роботодавці, соціальні служби, медичні установи, громадські організації, локальні ініціативи та неформальні соціальні мережі.

Правову основу для реалізації місцевих політик відтворення людського капіталу формує система місцевого самоврядування. Закон України «Про місцеве самоврядування в Україні» визначає правовий статус місцевого самоврядування та закріплює його принципи, серед яких законність, гласність, колегіальність і відповідальність органів та посадових осіб перед територіальними громадами. Чинна редакція документа на сайті Верховної Ради України подана як Закон України від 21 травня 1997 року № 280/97-ВР, що залишається базовим нормативним актом у цій сфері [1].

В умовах війни та повоєнної відбудови відтворення людського капіталу перестає бути виключно сферою соціальної політики. Воно переходить у площину публічного управління розвитком громади. Це означає, що органи місцевого самоврядування мають не лише забезпечувати надання окремих послуг – освітніх, соціальних, медичних чи адміністративних, – а формувати цілісну систему стратегічного управління людським капіталом. У такій системі людський капітал має бути окремим блоком стратегій розвитку громад із визначеними цілями, індикаторами, джерелами фінансування, відповідальними виконавцями та механізмами моніторингу.

Актуальність формування адаптивного інструментарію посилюється тим, що повоєнне середовище характеризується високою невизначеністю. Змінюються безпекові ризики, логістика, міграційні потоки, демографічна структура населення, потреби ринку праці, доступність освітніх і медичних послуг, а також донорські та державні програми підтримки. За даними UNHCR, у лютому 2025 року близько 10,6 млн українців залишалися переміщеними: 3,7 млн – усередині країни, а 6,9 млн – за кордоном; також зазначалося, що понад 2 млн житлових об'єктів були пошкоджені або зруйновані. Такі масштаби переміщення населення безпосередньо впливають на можливості громад планувати освітню мережу, соціальні послуги, житлову політику, ринок праці та потреби у перекваліфікації [2].

Метою дослідження є обґрунтування науково-прикладних засад формування адаптивного інструментарію відтворення людського капіталу територіальних громад в умовах інноваційного розвитку та повоєнного відновлення.

Під адаптивним інструментарієм відтворення людського капіталу територіальної громади доцільно розуміти систему взаємопов'язаних управлінських, освітньо-компетентнісних, економічних, соціально-інтеграційних, цифрово-аналітичних, партнерських і моніторингових інструментів, які дають змогу громаді своєчасно діагностувати втрати людського капіталу, визначати пріоритети, пілотувати рішення, масштабувати ефективні практики, оцінювати результативність і коригувати політику відповідно до змін зовнішнього середовища.

Особливість такого інструментарію полягає в тому, що він не може бути статичним набором заходів. У повоєнний період ефективна система управління людським капіталом має працювати за циклом: діагностика – пріоритизація – пілотування – масштабування –

моніторинг – коригування. Саме ця логіка дає змогу перейти від реактивного реагування на проблеми до проактивного управління розвитком громади.

Першим ключовим викликом для відтворення людського капіталу є міграція та висока мобільність населення. Переміщення населення має подвійний ефект. З одного боку, воно дає людям можливість зберегти безпеку й доступ до базових послуг. З іншого – порушує сталі траєкторії відтворення людського капіталу: перериває навчання, змінює зайнятість, послаблює соціальні зв'язки, створює додаткове навантаження на громади-реципієнти. Для органів місцевого самоврядування це означає ускладнення планування бюджету, мережі освітніх і соціальних послуг, житлової політики та кадрових потреб.

Другим викликом є демографічні втрати та деформація вікової структури. Повоєнне середовище посилює ризики скорочення населення, старіння, гендерно-вікових дисбалансів і зменшення частки економічно активних груп. Для громад це означає звуження локального кадрового резерву, зростання навантаження на працездатне населення, ускладнення міжпоколінної передачі компетентностей і потребу в спеціальних програмах утримання молоді. У цьому контексті громади мають переходити від універсальних соціальних програм до демографічно чутливого управління людським капіталом.

Третім викликом є освітні розриви та втрати навчального капіталу. Війна спричинила переривання навчання, нерівний доступ до очної або змішаної освіти, цифрову нерівність, погіршення освітнього середовища та психоемоційні бар'єри до навчання. Для територіальних громад це означає, що освітня політика не може обмежуватися лише утриманням мережі закладів освіти. Необхідними стають програми надолуження освітніх втрат, цифрове забезпечення учнів і педагогів, розвиток мікрокваліфікацій, професійної орієнтації, навчання дорослих і партнерств між громадою, бізнесом та освітніми установами.

Четвертим викликом є трансформація локальних ринків праці. Повоєнна економіка формуватиме нові професійні профілі, посилюватиме попит на цифрові, технічні, сервісні, логістичні, соціальні та управлінські компетентності. OECD у звіті OECD Economic Surveys: Ukraine 2025 подає Україну як об'єкт комплексного економічного аналізу в контексті відновлення, структурних реформ і довгострокової стійкості, а саме видання опубліковане 6 травня 2025 року й має DOI 10.1787/940cee85-en. Для громад це означає необхідність постійного моніторингу попиту на навички, розвитку коротких програм перекваліфікації, підтримки малого й середнього бізнесу, самозайнятості, ветеранського підприємництва та зайнятості внутрішньо переміщених осіб [3].

П'ятим викликом є соціальна інтеграція та згуртованість громади. Людський капітал реалізується не лише через формальні знання й професійні компетентності, а й через довіру, включеність у локальні мережі, готовність до співпраці та відчуття належності до громади. Якщо між місцевими жителями, ВПО, ветеранами, людьми з інвалідністю, молоддю та іншими групами виникають соціальні розриви, ефективність економічних та освітніх програм знижується. Тому відтворення людського капіталу має включати соціально-інтеграційний контур: програми включення, community hubs, психосоціальну підтримку, кейс-менеджмент, комунікаційні платформи та механізми участі.

З урахуванням зазначених викликів адаптивний інструментарій відтворення людського капіталу доцільно формувати як багатоблокову систему. Її першим елементом є інституційно-управлінський блок, що передбачає розроблення стратегії або програми розвитку людського капіталу громади, створення міжвідомчої координаційної групи, дорожньої карти заходів, регламентів взаємодії та проєктного офісу. Його результативність може вимірюватися наявністю затвердженої програми, часткою виконаних заходів, кількістю міжвідомчих рішень і обсягом залучених ресурсів.

У повоєнний період відтворення людського капіталу територіальних громад має розглядатися як стратегічний напрям локального розвитку, а не лише як складова соціальної політики. Його зміст охоплює відновлення освітньої безперервності, розвиток компетентностей, інтеграцію ВПО і ветеранів, підтримку зайнятості, соціальну згуртованість, цифрову аналітику та формування локальної інноваційної екосистеми.

Запропонований підхід до формування адаптивного інструментарію дає змогу перейти від фрагментарного управління окремими послугами до цілісної моделі відтворення людського капіталу. Її основою є взаємодія семи блоків: інституційно-управлінського, освітньо-компетентнісного, економіко-мотиваційного, соціально-інтеграційного, цифрово-аналітичного, партнерсько-мережевого та моніторингово-оцінювального.

Наукова новизна такого підходу полягає у трактуванні адаптивного інструментарію як динамічної системи місцевого управління, що функціонує за циклом діагностики, пріоритизації, пілотування, масштабування, моніторингу та коригування. Практичне значення полягає в можливості використання цієї системи як методичної основи для розроблення локальних програм відтворення людського капіталу в територіальних громадах України.

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (1997). *Law of Ukraine "On local self-government in Ukraine"* No. 280/97-VR. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/280/97-%D0%B2%D1%80>
2. United Nations High Commissioner for Refugees. (2025). *UNHCR: After three years of war, Ukrainians need peace and aid*. United Nations in Ukraine. URL: <https://ukraine.un.org/en/289506-unhcr-after-three-years-war-ukrainians-need-peace-and-aid>
3. OECD. (2025). *OECD Economic surveys: Ukraine 2025*. OECD Publishing. URL: <https://doi.org/10.1787/940cee85-en>

**Худецький Богдан, Клід Віктор**  
**Карпатський національний університет імені Василя Стефаника**

## **ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ У НАФТОГАЗОВИДОБУВНІЙ ГАЛУЗІ ЧЕРЕЗ ІНТЕГРАЦІЮ БІОІНДИКАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ У СИСТЕМУ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ**

Сучасний етап розвитку економіки країн Європейського Союзу характеризується переходом до моделі сталого розвитку, що передбачає інтеграцію екологічних критеріїв у систему прийняття управлінських рішень. У цьому контексті оцінка впливу на довкілля (ОВД) розглядається не лише як інструмент екологічного регулювання, але й як важливий механізм забезпечення економічної ефективності господарської діяльності через мінімізацію екологічних ризиків.

Імплементация Директиви 2011/92/ЄС в Україні через Закон «Про оцінку впливу на довкілля» (2017) створила нормативне підґрунтя для екологізації господарської діяльності. Водночас практика підготовки звітів з ОВД у нафтогазовидобувній галузі свідчить про наявність системних методичних обмежень, пов'язаних із недостатнім врахуванням біотичного компоненту довкілля.

Аналіз звітів з ОВД для об'єктів нафтогазовидобування Карпатського регіону (зокрема Чеканської та Ключівської площ) показує, що оцінка впливу на біорізноманіття здебільшого базується на інвентаризації видового складу флори і фауни та має переважно описовий характер. Такий підхід не дозволяє оцінити функціональний стан екосистем, їхню стійкість до антропогенного навантаження та потенціал до відновлення.

Особливої актуальності ця проблема набуває для територій, що входять до Смарагдової мережі або містять оселища, які охороняються відповідно до Резолюції № 4 Бернської конвенції. У межах досліджених площ виявлено наявність раритетних видів та цінних природних оселищ, однак відсутність уніфікованих підходів до оцінки впливу на такі об'єкти знижує ефективність природоохоронних та управлінських рішень.

У межах дослідження запропоновано підхід до екологізації системи ОВД, що передбачає інтеграцію біоіндикаційних і цитогенетичних методів у структуру оцінки впливу на довкілля. Методологія базується на багаторівневому підході.

### **1. Класичний рівень аналізу:**

- геоботанічні дослідження;
- зоологічні обстеження;
- аналіз структури біоценозів;
- оцінку стану природних оселищ, зокрема в межах Смарагдової мережі;
- ідентифікацію раритетних видів (Червона книга України, Бернська конвенція).

## **2. Біоіндикаційний рівень:**

- використання рослинних тест-систем (зокрема *Allium* сера) для оцінки токсичності ґрунтів;
- оцінка впливу забруднення на репродуктивні і фізіологічні функції модельних видів рослин та ін.

## **3. Цитогенетичний рівень:**

- визначення мітотичного індексу;
- аналіз хромосомних аберацій;
- застосування мікроядерного тесту для оцінки генотоксичних ефектів.

Інтеграція результатів цих рівнів дозволяє сформувати цілісну картину стану довкілля та перейти від описового до аналітичного і прогностичного підходу. З економічної точки зору впровадження такого підходу має суттєве значення, оскільки:

- дозволяє мінімізувати ризики прийняття неефективних або екологічно небезпечних інвестиційних рішень;
- знижує потенційні витрати, пов'язані з ліквідацією екологічних наслідків діяльності;
- сприяє підвищенню екологічної відповідальності суб'єктів господарювання;
- забезпечує відповідність діяльності принципам сталого розвитку та стандартам ЄС;
- формує додаткову доказову базу у разі виникнення екологічних спорів.

Апробація запропонованого підходу на досліджених територіях показала, що біоіндикаційні та цитогенетичні методи дозволяють виявляти зміни функціонального стану екосистем, які не фіксуються традиційними методами. Для ділянок, що зазнають техногенного навантаження, характерним є зниження мітотичної активності клітин тест-об'єктів, підвищення частоти хромосомних порушень та збільшення стерильності пилку рослин-індикаторів.

Виявлені зміни мають чітко виражений просторовий характер і корелюють із рівнем антропогенного впливу, що дозволяє використовувати їх для зонування територій за ступенем екологічного ризику. При цьому інтегральні біологічні показники демонструють вищу чутливість до кумулятивного впливу забруднювачів порівняно з традиційними аналітичними методами.

Особливої актуальності це набуває в умовах воєнного часу, коли антропогенне навантаження на довкілля зростає, а ризики деградації екосистем суттєво посилюються. У таких умовах біоіндикаційні методи можуть виконувати функцію оперативного інструменту оцінки стану довкілля та підтримки прийняття рішень.

Важливим аспектом є також можливість використання отриманих результатів для просторового зонування територій за рівнем екологічного ризику, що дозволяє визначати зони допустимого та обмеженого використання; обґрунтовувати природоохоронні заходи; – оптимізувати розміщення інфраструктурних об'єктів; формувати екологічно орієнтовані сценарії розвитку територій.

Таким чином, інтеграція біоіндикаційних підходів у систему ОВД забезпечує перехід до якісно нового рівня екологізації економіки, де екологічні фактори стають невід'ємною складовою процесу прийняття управлінських рішень. Запропонований підхід може бути використаний для вдосконалення методичного забезпечення ОВД та підвищення ефективності екологічного менеджменту у нафтогазовидобувній галузі України в контексті європейської інтеграції. З економічної точки зору інтеграція біоіндикаційних підходів у систему ОВД сприяє підвищенню ефективності інвестиційних рішень, зменшенню витрат на ліквідацію екологічних наслідків та забезпеченню відповідності діяльності стандартам ЄС.

1. European Commission Joint Research Centre. (2026). Towards the second EU ecosystem assessment. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
2. United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Ukraine: Rapid environmental assessment of the Kakhovka Dam breach. Nairobi: UNEP.
3. United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). Environmental impacts of armed conflicts. Nairobi: UNEP.
4. European Environment Agency (EEA). (2020). Air quality in Europe – 2020 report. Copenhagen: EEA.
5. World Health Organization (WHO). (2016). Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks. Geneva: WHO.
6. Markert, B., Breure, A. M., & Zechmeister, H. G. (2003). Bioindicators and biomonitoring: Principles, concepts and applications. Elsevier.
7. Leme, D. M., & Marin-Morales, M. A. (2009). Allium cepa test in environmental monitoring: A review. Mutation Research, 682(1), 71–81.
8. Fenech, M. (2000). The in vitro micronucleus technique. Mutation Research, 455(1–2), 81–95.
9. · Rakoid, O. O., Boholiubov, V. M., Klepko, A. V., & Bondar, V. I. (2023). Environmental monitoring. Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.
10. Turgel, I., Bozhko, L., Biserov, E., & Seitkhamzina, G. (2025). Global insights, regional action: Approaches to environmental policy assessment. Sustainability, 17, 9280.
11. Lyons, B. P., Thain, J. E., Stentiford, G. D., Hylland, K., Davies, I. M., & Vethaak, A. D. (2010). Using biological effects tools to define good environmental status. Marine Pollution Bulletin, 60, 1647–1651.
12. Bond, A., Retief, F., Morrison-Saunders, A., Pope, J., & Gunn, J. A. E. (2018). What makes effective environmental impact assessment? Impact Assessment and Project Appraisal, 36(2), 103–108.

**Щербан Ореста, Щербан Тарас**  
**Національний університет «Львівська політехніка»**  
**Квасній Любов**  
**Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка**

## **ЦИФРОВІЗАЦІЯ ТУРИСТИЧНОЇ ІНДУСТРІЇ ЯК ЧИННИК СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ЕКОНОМІКИ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ**

У сучасних умовах глобальних екологічних викликів особливого значення набуває пошук ефективних інструментів екологізації економіки. Туристична галузь, яка є одним із важливих секторів економіки Європейського Союзу, водночас створює значне навантаження на довкілля через транспортні перевезення, споживання енергоресурсів, утворення відходів та надмірне використання природних рекреаційних ресурсів.

У зв'язку з цим цифровізація туризму стає важливим напрямом інвестиційної політики, що дозволяє поєднати економічне зростання з принципами сталого розвитку.

Проблематиці цифрової трансформації туристичної галузі присвячені праці багатьох вітчизняних і зарубіжних науковців. Дослідники наголошують, що використання цифрових технологій, таких як big data, хмарні сервіси, мобільні додатки, штучний інтелект та системи онлайн-бронювання, суттєво підвищує ефективність функціонування туристичного бізнесу та знижує його негативний вплив на довкілля.

Особлива увага приділяється концепції smart tourism, яка активно впроваджується в країнах ЄС.

Зокрема, у дослідженні Л. Джуліанті та А. Пінпака проаналізовано вплив цифровізації інвестицій на розвиток туристичної індустрії, де доведено, що застосування цифрових

інструментів стимулює інвестиційні процеси, водночас потребуючи подальшого вдосконалення нормативно-правової бази [1].

У роботі Г. Бекеле цифрову трансформацію туризму розглянуто на основі бібліометричного аналізу, що дало змогу виокремити основні напрями наукових досліджень, серед яких цифровий маркетинг, цифрова економіка та інноваційні технології у сфері гостинності [2].

І. Гутьєрріз, Ж. Феррейра та П. Фернандеш у своїх наукових розвідках акцентують увагу на еволюційних аспектах цифрової трансформації туризму, підкреслюючи її позитивний вплив на розвиток підприємств і регіонів, а також на формування новітніх бізнес-моделей у галузі [3].

Сучасні дослідження також висвітлюють значення цифрових платформ у забезпеченні сталого розвитку туризму. Зокрема, у публікації (MDPI, 2025) обґрунтовано, що цифрові платформи впливають на структуру ринку, доступність туристичних послуг і соціально-економічний розвиток галузі [4].

У праці А. Полухіної та співавторів проаналізовано використання цифрових рішень (Big Data, мобільні застосунки, онлайн-сервіси) як інструменту підвищення ефективності туристичних послуг та забезпечення сталого розвитку туристичних дестинацій [5].

Крім того, Т. Різова та Н. Дімова досліджують управління інвестиціями в туризмі в умовах цифровізації, наголошуючи на важливості стратегічного планування, розвитку державно-приватного партнерства та впровадження інноваційних підходів до інвестування [6].

Проблематика розвитку туризму в умовах цифрової економіки також перебуває в центрі уваги таких науковців, як О. Сущенко, Н. Дехтяр, О. Клок, Р. Горчак, М. Шевелюк та ін. [7–9].

Вагоме значення у процесі цифрової трансформації туристичної сфери мають сучасні інноваційні технології, зокрема штучний інтелект, Big Data, хмарні сервіси, а також інструменти віртуальної та доповненої реальності. Їх застосування відкриває можливості для персоналізації туристичних продуктів, прогнозування попиту, удосконалення бізнес-процесів і підвищення рівня сервісу [9]. Зокрема, обробка великих обсягів даних дозволяє туристичним компаніям глибше аналізувати поведінку клієнтів і формувати пропозиції, максимально наближені до їхніх запитів.

Цифровізація туристичного сектору передбачає активне впровадження сучасних інформаційно-комунікаційних технологій у процеси організації, управління та споживання туристичних послуг.

Екологічний аспект цифровізації полягає у використанні цифрових технологій, що сприяє:

- зменшенню використання паперових носіїв;
- оптимізації транспортних маршрутів;
- зниженню викидів CO<sub>2</sub>;
- контролю туристичного навантаження на природні території;
- зменшенню перенасичення туристичних дестинацій.

До основних напрямів цифрової трансформації туризму належать:

- онлайн-платформи бронювання;
- мобільні туристичні застосунки;
- електронні квитки;
- цифрові карти та навігаційні системи;
- системи моніторингу туристичних потоків;
- віртуальні тури та VR/AR технології.

Застосування цифрових технологій для досягнення сталості представлені в табл. 1, яка демонструє ключові напрями застосування ключових технологій цифровізації для сталого розвитку туристичних дестинацій (табл. 1).

Таблиця 1. Напрями сталого розвитку, цифрові рішення та їх вплив на туристичні дестинації

| Напрямок сталого розвитку | Приклади цифрових рішень    | Очікувані результати для дестинації        |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| Екологічний               | онлайн-квитки, e-documents, | зниження CO <sub>2</sub> , менше паперових |

|                                  |                                                          |                                                          |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| (зменшення впливу на довкілля)   | системи моніторингу викидів                              | ресурсів, контроль навантаження                          |
| Енергетична ефективність         | smart-готелі, IoT-системи управління енергією            | економія енергоресурсів, зниження витрат                 |
| Управління туристичними потоками | big data, GPS-трекінг, мобільні додатки                  | зменшення overtourism, рівномірний розподіл туристів     |
| Транспорт і мобільність          | цифрові платформи транспорту, e-ticketing                | зменшення заторів, оптимізація маршрутів                 |
| Інформаційна доступність         | мобільні додатки, онлайн-платформи                       | підвищення якості сервісу, зростання туристичного потоку |
| Управління відходами             | smart-системи сортування, датчики заповнення контейнерів | ефективна утилізація, чистота DESTINACIY                 |

Таким чином, цифровізація виступає інструментом зеленої трансформації економіки. Розвиток цифрового туризму дозволяє:

- підвищити конкурентоспроможність галузі;
- знизити екологічні ризики;
- забезпечити раціональне використання ресурсів;
- стимулювати інвестиційну активність.

Європейський Союз активно реалізує політику Green Deal, у межах якої цифровізація та екологізація розглядаються як взаємопов'язані процеси.

Отже, цифровізація туризму є важливим інструментом екологізації економіки Європейського Союзу та забезпечення її сталого розвитку. Інвестиції у цифрові технології сприяють підвищенню ефективності туристичної галузі, зменшенню екологічного навантаження та формуванню зеленого майбутнього ЄС.

1. Bekele, H. (2024). *Digitalization and digital transformation in the tourism industry: A bibliometric review and research agenda*. Emerald Publishing. <https://www.emerald.com>
2. Gorcsak, R. (2025). Tsyfrovizatsiia vnutrishnoho turyzmu v Ukraini: stan, initsiatyvy ta analityka [Digitalization of domestic tourism in Ukraine: state, initiatives and analytics]. *Innovations and Technologies in the Service Sphere and Food Industry*, 2(16), 139–145. [https://doi.org/10.32782/2708-4949.2\(16\).2025.22](https://doi.org/10.32782/2708-4949.2(16).2025.22)
3. Gutierrez, I., Ferreira, J. J., & Fernandes, P. O. (2023). Digital transformation and the new combinations in tourism: A systematic literature review. *Tourism and Hospitality Research*, 25(2), 194–213. <https://doi.org/10.1177/14673584231198414>
4. Julianti, L., & Pinpak, A. (2024). The digitalization of investment impact on developing tourism industry. *Journal of Human Rights, Culture and Legal System*. <https://journal.unhas.ac.id/index.php/jhcls>
5. Polukhina, A., et al. (2024). *Digital solutions in tourism as a way to boost sustainable development*. MDPI. <https://www.mdpi.com>
6. Rizova, T., & Dimova, N. (2025). Investment management in tourism through implementing digital technologies. *Journal of Management Research and Review*. <https://www.emerald.com>
7. Sheveliuk, M. M. (2021). Tsyfrovizatsiia u sferi turyzmu: innovatsiini trendy i priorytetni napriamy rozvytku [Digitalization in the field of tourism: innovative trends and priority development directions]. *Pytannia kulturolohi*, 38, 226–235. <https://doi.org/10.31866/2410-1311.38.2021.245956>
8. Sushchenko, O. A., Dekhtiar, N. A., & Klok, O. P. (Eds.). (2023). *Rozvytok turyzmu v umovakh tsyfrovizatsii ekonomiky* [Tourism development in the conditions of digitalization of the economy]. Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics. <https://www.hneu.edu.ua>
9. The role of digital tourism platforms in advancing sustainable development. (2025). *Sustainability*, 17(... якщо є номер випуску ...). <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>

## СЕКЦІЯ 4. ТЕХНОЛОГІЇ ІМЕРСИВНОЇ ТА РОЗШИРЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Басала Валентин

*Національний університет «Львівська політехніка»*

### ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ

В умовах кліматичних змін моніторинг довкілля вимагає не лише точного збору даних, а й їхньої ефективної та зрозумілої візуалізації. Одним із перспективних напрямів є застосування технологій доповненої реальності (AR), які дозволяють поєднувати цифрову інформацію з реальним середовищем та значно спрощують сприйняття складних екологічних даних.

Водночас результати екологічного моніторингу та моделювання процесів гідрогазодинаміки зазвичай подаються у двовимірному вигляді та є складними для сприйняття нефахівцями [1]. У зв'язку з цим виникає потреба у нових підходах до представлення інформації, які забезпечують більш зрозуміле та доступне подання інформації для користувачів.

У цьому контексті доповнена реальність дозволяє накладати віртуальні об'єкти на реальне середовище, що дає змогу візуалізувати екологічні параметри безпосередньо у місці їх вимірювання. Користувачі можуть спостерігати такі показники, як температура, вологість, швидкість і напрямок вітру у вигляді тривимірних об'єктів у реальному просторі, використовуючи пристрої з підтримкою AR, наприклад, гарнітури доповненої реальності [1].

Особливо ефективним у цьому напрямі є поєднання доповненої реальності із технологіями Інтернету речей (IoT), які забезпечують збір даних за допомогою сенсорних систем. Такі системи дозволяють отримувати інформацію про стан довкілля в режимі реального часу та передавати її до хмарних платформ для подальшої обробки [2]. Інтерфейси доповненої реальності забезпечують інтерактивне відображення цих даних, що полегшує їх сприйняття користувачами.

У системах моніторингу довкілля на базі IoT використовуються сенсори для вимірювання атмосферних параметрів і концентрації забруднюючих речовин [2]. Дані з цих сенсорів можуть використовуватися в застосунках доповненої реальності, що дозволяє створювати інноваційні способи взаємодії з інформацією, а саме у вигляді інтерактивних сценаріїв або навчальних застосунків.

Окрім моніторингу населених територій, технології доповненої реальності широко застосовуються у збереженні природних екосистем та біорізноманіття. Наприклад, у проєктах зі збереження тропічних лісів дослідники використовують системи відстеження диких тварин на базі доповненої реальності для вивчення пересування видів, що перебувають під загрозою зникнення. Поєднання GPS-даних із можливостями доповненої реальності дозволяє відображати переміщення тварин у режимі реального часу безпосередньо в середовищі їх існування. Дослідник, оснащений пристроєм доповненої реальності, може спостерігати віртуальні шляхи руху тварин, накладені на реальне середовище, що дає змогу краще розуміти їхню поведінку [3]. Це допомагає точніше планувати заходи з охорони довкілля.

Ще одним напрямом є використання доповненої реальності для просторового картографування екосистем. Поєднання даних про місцевість із можливостями AR дає змогу створювати інтерактивні тривимірні карти, які відображають стан рослинності, водних ресурсів та використання земельних ресурсів. Такі інструменти забезпечують більш точний аналіз змін довкілля та допомагають раціонально використовувати природні ресурси.

Прикладом такого підходу є застосування доповненої реальності для оцінки стану та різноманітності рифових екосистем. Використовуючи підводні пристрої доповненої реальності,

морські біологи створюють тривимірні карти, на які накладаються дані про види коралів та умови навколишнього середовища [3]. Це дає змогу виявляти проблемні ділянки, наприклад, знебарвлення коралів або надмірний ріст водоростей. Цю інформацію використовують для охорони морських територій і відновлення коралових рифів.

Окремо варто відзначити аграрну сферу, де технології доповненої реальності можуть використовуватися для моніторингу екологічних параметрів навколишнього середовища. AR дозволяє візуалізувати показники якості повітря, рівень забруднення води та інші характеристики, що допомагає швидко виявляти негативні зміни. Поєднання доповненої реальності з технологіями Інтернету речей дозволяє визначати координати рослин і накладати на них дані сенсорів у вигляді тривимірних віртуальних об'єктів або тексту в режимі реального часу [4]. Такі візуальні елементи можуть змінювати свої характеристики залежно від стану рослин. Це підвищує ефективність використання ресурсів і сприяє збереженню врожаю.

AR-технології застосовуються і у сфері реагування на надзвичайні ситуації екологічного характеру. Такі системи можуть відображати межі небезпечних зон, маршрути евакуації та іншу важливу інформацію, що підвищує рівень безпеки та забезпечує узгоджені дії у складних умовах.

Важливо також, що застосування доповненої реальності сприяє кращому розумінню екологічних проблем населенням. Інтерактивні рішення цієї технології, з використанням концепції «серйозних ігор», дозволяють візуалізувати екологічні показники у доступній формі та сприяють участі користувачів в аналізі стану довкілля, що робить процес моніторингу більш ефективним і корисним для суспільства [2].

Отже, технології доповненої реальності у поєднанні з Інтернетом речей є перспективними інструментами для розвитку сучасних систем екологічного моніторингу, що забезпечують не лише збір і аналіз даних, а й їх ефективну візуалізацію та зрозуміле пояснення. Вони дають змогу поєднувати різні екологічні дані. Це підвищує точність їх оцінки та допомагає приймати рішення. Також ці технології розширюють можливості дослідження природних екосистем та підвищують екологічну свідомість населення.

1. Yabuki, N., Furubayashi, S., Hamada, Y., & Fukuda, T. (2012). Collaborative visualization of environmental simulation result and sensing data using augmented reality. In Y. Luo (Ed.), *Cooperative design, visualization, and engineering* (pp. 227-230). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

2. Pokrić, B., Krčo, S., Drajić, D., Pokrić, M., Rajs, V., Mihajlović, Ž., Knežević, P., & Jovanović, D. (2015). Augmented reality enabled IoT services for environmental monitoring utilising serious gaming concept. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 6(1), 37-55.

3. Augmented reality for environmental monitoring and conservation: Innovations and applications. (2025, September 15). VPRC. <https://vprc.in/ar-and-vr/augmented-reality-for-environmental-monitoring-and-conservation-innovations-and-applications/>.

4. Phupattanasilp, P., & Tong, S.-R. (2019). Augmented reality in the integrative Internet of Things (AR-IoT): Application for precision farming. *Sustainability*, 11(9), 2658. <https://doi.org/10.3390/su11092658>.

**Kliuchak Olha, Shevtsiv Nikita**  
**Lviv Polytechnic National University**

## **THE DOUBLE-EDGED SWORD: AI'S ROLE IN BOTH CAUSING AND SOLVING THE CLIMATE CRISIS**

**Abstract.** Artificial intelligence has emerged as one of the most transformative technologies of the 21st century, yet its relationship with the environment is deeply paradoxical. On one hand, training

large language models consumes enormous amounts of energy and water, contributing to carbon emissions and electronic waste. On the other hand, AI-powered systems are revolutionizing environmental monitoring, energy optimization, precision agriculture, and disaster prediction. This article examines both sides of this equation, presents quantitative data on AI's environmental footprint, and explores pathways toward sustainable AI development that maximizes ecological benefits while minimizing harm.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Climate Change, Carbon Footprint, Green AI, Sustainability, Energy Consumption, Environmental Monitoring, Precision Agriculture.

1. Introduction

The world faces two defining forces of the 2020s: the rapid proliferation of artificial intelligence and the escalating climate crisis. Global temperatures continue to rise, extreme weather events are becoming more frequent, and biodiversity loss accelerates at an alarming rate. Simultaneously, AI systems are being deployed at unprecedented scale – from chatbots serving billions of users to autonomous systems managing critical infrastructure.

This convergence creates a fundamental paradox. The very technology that promises to help solve environmental challenges is itself a significant contributor to the problem. Data centers powering AI models consume approximately 1–2% of global electricity, a figure projected to reach 3–4% by 2030. Yet AI-enabled optimizations in energy grids alone could reduce global emissions by up to 4% – roughly equivalent to the entire aviation industry’s footprint.

This article provides a balanced examination of AI’s dual role in the climate crisis, supported by current data and real-world case studies. We argue that the path forward is not to limit AI development, but to ensure it is developed and deployed responsibly, with environmental impact as a first-class consideration.

2. The Environmental Cost of AI

**2.1 Energy Consumption of Model Training.** Training a single large language model requires extraordinary computational resources. Research from the University of Massachusetts Amherst estimated that training a transformer model with 213 million parameters produces approximately 284 tonnes of CO<sub>2</sub> – equivalent to five times the lifetime emissions of an average car (Strubell et al., 2019). Modern models like GPT-4, with an estimated 1.8 trillion parameters, require significantly more energy (Patterson et al., 2021).

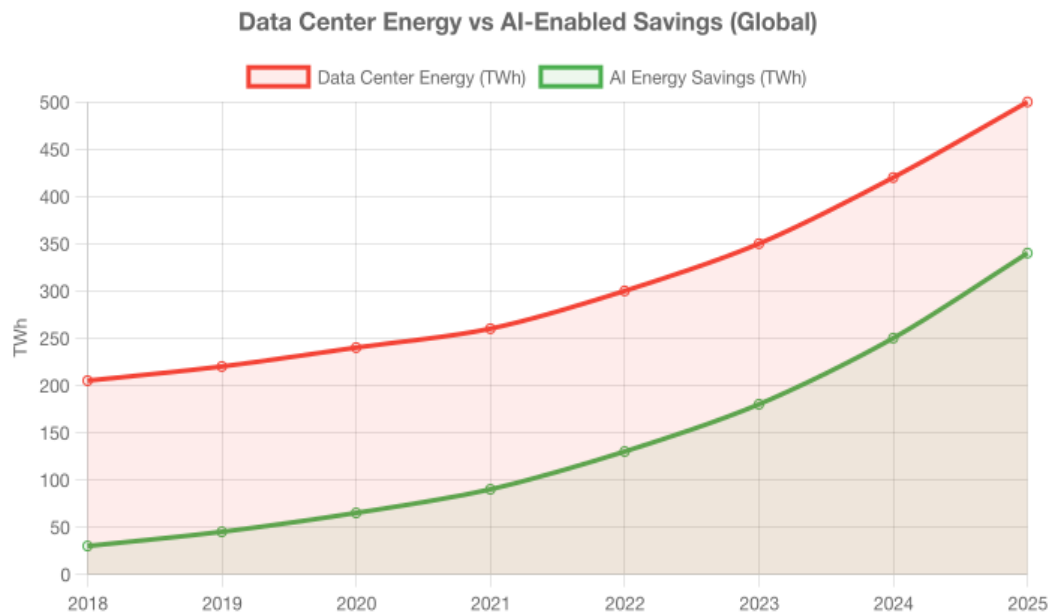


Figure 1: Estimated energy consumption for training major AI models (MWh)

Beyond training, inference – the process of running a trained model to generate responses – accounts for an even larger share of total energy consumption. OpenAI’s ChatGPT, serving over 200

million users, is estimated to consume approximately 564 MWh daily, equivalent to powering 18,000 average US homes.

**2.2 Water Resources for Cooling.** Data centers require massive amounts of water for cooling systems. A 2024 study published in Nature revealed that Microsoft’s global water consumption increased by 34% between 2021 and 2023, largely attributed to AI workloads (Li et al., 2023). Google reported a 20% increase over the same period. Training GPT-3 alone consumed an estimated 700,000 liters of fresh water.

Table 1. Water consumption by major tech companies (2021–2023)

| Company   | 2021 (Billion L) | 2023 (Billion L) | Increase |
|-----------|------------------|------------------|----------|
| Microsoft | 5.6              | 7.5              | +34%     |
| Google    | 15.5             | 18.6             | +20%     |
| Meta      | 4.2              | 5.8              | +38%     |

**2.3 Electronic Waste and Rare Materials.** The AI hardware lifecycle presents another environmental challenge. GPU chips used for AI training have a typical lifespan of 2–3 years before being replaced. The production of these chips requires rare earth elements – mining which causes significant environmental degradation. NVIDIA shipped approximately 3.76 million data center GPUs in 2023, each containing cobalt, lithium, and other materials extracted through environmentally destructive processes.

**2.4 The Rebound Effect.** Perhaps most concerning is the rebound effect: as AI becomes more efficient, demand increases, potentially negating efficiency gains. The International Energy Agency projects that data center electricity consumption could double by 2026, driven primarily by AI workloads (International Energy Agency, 2024). This mirrors historical patterns where technological efficiency improvements led to increased rather than decreased total resource consumption.

**3. AI as an Environmental Solution**

**3.1 Environmental Monitoring.** AI-powered satellite image analysis has transformed environmental monitoring. Global Forest Watch uses machine learning to detect deforestation in near real-time, processing over 40,000 Landsat images annually. The system can identify illegal logging within 24 hours, compared to weeks or months with traditional methods. Similarly, Ocean Cleanup’s AI systems track plastic pollution across ocean currents, increasing collection efficiency by 300%.

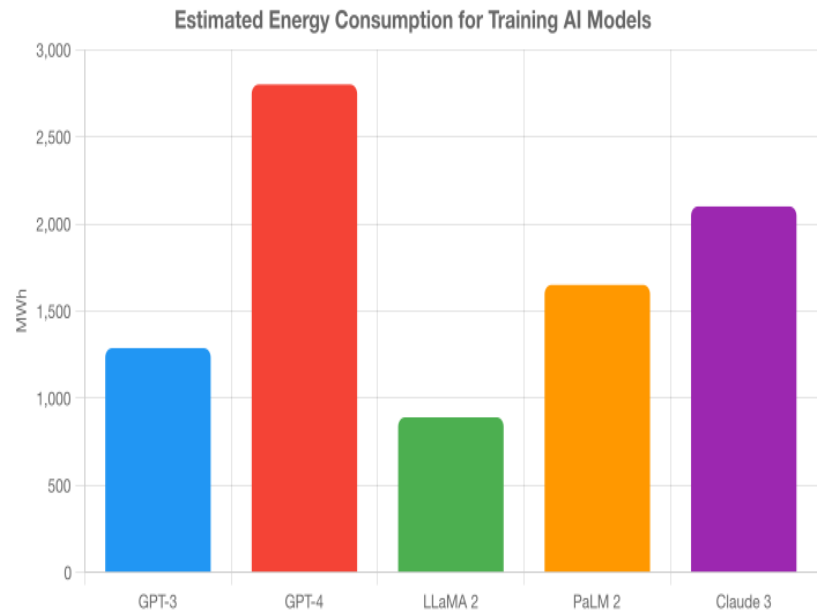


Figure 2: Distribution of AI applications in environmental sustainability

**3.2 Energy Grid Optimization.** Google’s DeepMind reduced the energy used for cooling its data centers by 40% using AI-driven optimization – a technique now being applied to national power

grids. In the UK, the National Grid uses AI to predict energy demand with 95% accuracy, enabling better integration of intermittent renewable sources. The IEA estimates that AI-optimized grids could reduce global CO<sub>2</sub> emissions by 2.6 gigatonnes annually by 2030 (International Energy Agency, 2024).

**3.3 Precision Agriculture.** AI-driven precision agriculture reduces environmental impact while maintaining crop yields. Computer vision systems can identify individual weeds, enabling targeted herbicide application that reduces chemical usage by up to 90%. Satellite-guided irrigation systems have demonstrated 30% water savings in large-scale farming operations. The FAO estimates that widespread adoption of AI in agriculture could reduce the sector’s greenhouse gas emissions by 20% by 2030 (FAO, 2024).

**3.4 New Materials and Waste Reduction.** AI is accelerating the discovery of sustainable materials. Google DeepMind’s GNoME project identified 2.2 million new crystal structures, including materials for more efficient solar cells and batteries (Google DeepMind, 2023). In waste management, AI-powered sorting systems achieve 95% accuracy in recycling facilities, compared to 70% for manual sorting.

**3.5 Disaster Prediction and Response.** AI models now predict natural disasters with unprecedented accuracy. Google’s flood forecasting system covers 460 million people across 80 countries, providing warnings up to 7 days in advance. NASA’s AI-powered wildfire detection system identifies fires within minutes of ignition using satellite data.

4. Weighing the Scales

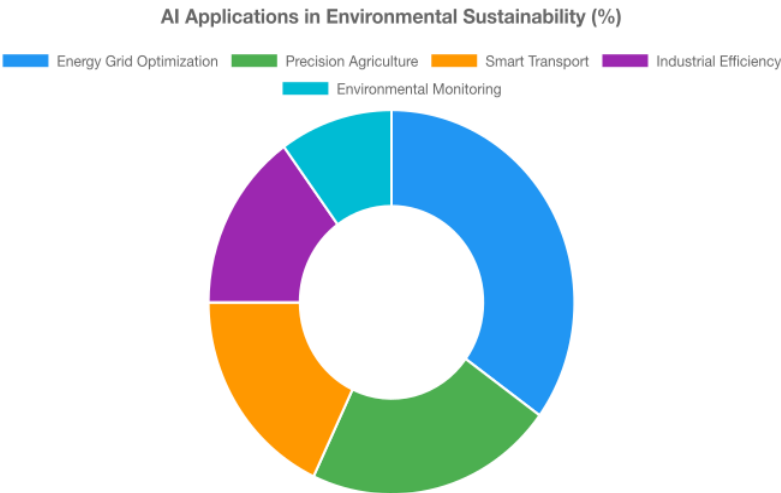


Figure 3: Data center energy consumption vs AI-enabled energy savings (TWh, global)

The quantitative comparison reveals a nuanced picture. While data center energy consumption is projected to reach 500 TWh by 2025, AI-enabled optimizations across energy, agriculture, transport, and industry could save an estimated 340 TWh – a ratio that is rapidly improving (Rolnick et al., 2022).

Table 2. Estimated annual CO<sub>2</sub> impact of AI by sector (projected 2030)

| Category    | AI Cost (CO <sub>2</sub> /yr) | AI Savings (CO <sub>2</sub> /yr) | Net Impact |
|-------------|-------------------------------|----------------------------------|------------|
| Energy      | 300 Mt                        | 2,600 Mt                         | –2,300 Mt  |
| Agriculture | 15 Mt                         | 800 Mt                           | –785 Mt    |
| Transport   | 20 Mt                         | 1,200 Mt                         | –1,180 Mt  |
| Industry    | 50 Mt                         | 600 Mt                           | –550 Mt    |
| Total       | 385 Mt                        | 5,200 Mt                         | –4,815 Mt  |

However, these projections assume widespread adoption of AI-optimized systems, which requires substantial infrastructure investment. The rebound effect could erode gains if increased AI efficiency simply drives more consumption (Kaack et al., 2022).

### 5. The Path to Green AI

Researchers are developing techniques to dramatically reduce AI's computational requirements. Model distillation, pruning, and quantization can reduce model size by 90% while retaining 95% of performance (Dodge et al., 2022). Major cloud providers are increasingly powering data centers with renewable energy. Google achieved 100% renewable energy matching for its global operations in 2023.

The EU AI Act, effective from 2025, includes provisions for environmental reporting of AI systems (European Commission, 2024). Similar initiatives are emerging in the US. Policymakers and developers should prioritize applications with the highest environmental return on computational investment.

### 6. Conclusion

Artificial intelligence is neither the villain nor the hero of the climate crisis – it is a powerful tool whose impact depends entirely on how it is developed and deployed. The data presented demonstrates that AI's potential environmental benefits significantly outweigh its costs, but only if the technology community takes deliberate action to minimize its footprint while maximizing its positive applications.

The path forward requires a multi-stakeholder approach: researchers must continue developing more efficient architectures, companies must commit to genuine renewable energy adoption, regulators must establish transparent reporting standards, and society must demand that AI development serves environmental goals alongside commercial ones.

1. Dodge, J., Ilharco, G., Schwartz, R., Farhadi, A., Hajishirzi, H., & Smith, N. (2022). Measuring the carbon intensity of AI in practice. In *Proceedings of the 2022 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAccT '22)* (pp. 1877–1886). ACM. <https://doi.org/10.1145/3531146.3533234>
2. European Commission. (2024). *EU AI Act: Environmental provisions and reporting requirements*. Publications Office of the European Union.
3. FAO. (2024). *AI in agriculture: Opportunities and challenges for sustainable development*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
4. Google DeepMind. (2023). *GNoME: Scaling deep learning for materials discovery*. Google DeepMind Research.
5. International Energy Agency. (2024). *Data centres and data transmission networks*. IEA. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>
6. Kaack, L. H., Donti, P. L., Strubell, E., Kamiya, G., Creutzig, F., & Rolnick, D. (2022). Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 12(6), 518–527. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01377-7>
7. Li, P., Yang, J., Islam, M. A., & Ren, S. (2023). Making AI less “thirsty”: Uncovering and addressing the secret water footprint of AI models. *Nature Communications*, 14(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44678-3>
8. Patterson, D., Gonzalez, J., Le, Q., Liang, C., Munguia, L.-M., Rothchild, D., So, D., Texier, M., & Dean, J. (2021). *Carbon emissions and large neural network training*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.10350>
9. Rolnick, D., Donti, P. L., Kaack, L. H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A. S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A., Luccioni, A. S., Maharaj, T., Sherwin, E. D., Muber, K. S., Kording, K. P., Gomes, C. P., Ng, A. Y., Hassabis, D., Platt, J. C., ... Bengio, Y. (2022). Tackling climate change with machine learning. *ACM Computing Surveys*, 55(2), 1–96. <https://doi.org/10.1145/3485128>

10. Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. In *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (pp. 3645–3650). ACL. <https://doi.org/10.18653/v1/P19-1355>

**Назаркевич Оксана**  
*Національний університет «Львівська політехніка»,  
Державна установа Інститут регіональних досліджень ім. М. І. Долишнього НАН  
України*

### **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ В АГРОСЕКТОРІ ЯК ЧИННИК ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ ТА МІНІМІЗАЦІЇ НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ**

Проблема забезпечення продовольством людство не втратила своєї актуальності від найдавніших часів і потребує першочергового вирішення сьогодні. 24 квітня 2026 року було представлено Глобальний звіт про продовольчі кризи за 2026 рік (Global Report on Food Crises), який повідомляє про підтвердження двох голодоморів у 2025 році (у деяких частинах сектору Газу та Судану). На жаль, шість попередніх звітів демонстрували щорічне зростання кількості людей, які зіткнулися з гострим голодом і недоїданням. За оцінками міжнародних гуманітарних організацій, від причин, пов'язаних із голодом, щодня помирає від 19 000 до 25 000 людей. Це означає, що кожні 4–5 секунд у світі обривається одне життя через брак їжі, а майже 45% усіх смертей дітей віком до 5 років зумовлюють причин, пов'язані із недоїданням [1].

Воєнні конфлікти, кліматичні зміни, економічна нестабільність та стрімке збільшення людей у світі зумовлюють необхідність оптимізації й переміни виробничої системи сільськогосподарської продукції та її переробки. Якщо опертися на прогнози ООН про збільшення населення Землі ще на 2 млрд до 2050 року та зниження врожайності на 25 відсотків на відкритому повітрі через зміну клімату, то першоосновою виробничої парадигми має бути максимальна ефективність – збільшення продовольства та зменшення навантаження на екосистему.

Технології штучного інтелекту пропонують нові можливості підвищення ефективності виробництва сільськогосподарської продукції через зменшення витрат та значне підвищення врожайності. Так збільшувати врожайності в довгостроковій перспективі сприятиме регенеративне сільське господарство, яке забезпечує відновленню ґрунтів, підвищення біорізноманіття, утримання води та секвестрацію вуглецю, мінімізацію обробітку землі, покривних культурах, сівоzmіні та інтеграцію тваринництва. Даний підхід часто порівнюють з органічним землеробством, але воно робить більший акцент на відновленні екосистем, а не лише відмову від хімікатів. Моделі штучного інтелекту, що використовують геопросторові дані, можуть аналізувати зміни у ґрунтово-рослинному покриві та землекористуванні, здоров'я ґрунту та доступність води на великих ділянках землі, допомагаючи плануванню регенеративних ландшафтів. Для поширення регенеративного сільського господарства вкрай важливим є зменшення використання пестицидів. Рішення на основі штучного інтелекту забезпечують прогнозування і виявлення шкідників, а відтак зменшувати обробіток посівів пестицидами. Інтелектуальні системи іригації, що базуються на датчиках вологості ґрунту та аналізі евапотранспірації, запобігають перевитратам води та засолюванню земель.

Розумні машини допомагають боротися не лише із шкідниками сільськогосподарських культур, а й підтримувати і покращувати роботу основних запилювачів рослин - бджіл, які підвищують врожайність на 30–40% та покращують якість плодів і насіння. Штучний інтелект може здійснювати постійний моніторинг стану бджіл, аналізуючи дані з різних датчиків,

встановлених у вуликах. Ці датчики можуть вимірювати температуру, вологість, вагу вулика, а також звуки, що видають бджоли і інформувати про хвороби, нестачу кормів чи роїння.

Використання супутників, дронів та наземних датчиків, щоб визначити точні потреби кожної ділянки поля та проводити обробіток стало звичним явищем великих аграрних підприємств в Україні. Напевно відчутний брак робочої сили у сільській місцевості буде також покриватися за рахунок використання автономних тракторів та дронів, які можуть працювати без перерви, проводячи посів, моніторинг та збір врожаю з надзвичайною точністю. Звісно, використання розумних машин має багато викликів, які потребують глобальних і вартісних рішень, так само як і збереження життя кожної людини. Вболіваємо за сталий раціональний розвиток аграрного сектору, який балансує економічний стан воюючої України уже п'ятий рік, а відтак зможе зупинити безглузду втрату життя на Планеті.

Отже, інтелектуалізація аграрного сектору є не просто технологічним трендом, а виступає базовим інструментом забезпечення глобальної продовольчої стійкості. Вона дозволяє розірвати пряму залежність між зростанням обсягів виробництва та рівнем екологічної шкоди, забезпечуючи перехід до ресурсозберігаючого, високоефективного виробництва.

1. Global Network Against Food Crises. (2026). *2026 Global report on food crises: Joint analysis for better decisions*. Food and Agriculture Organization; World Food Programme. <https://doi.org/10.4060/cd9424en>

**Рогальова Вероніка, Марікуца Уляна**  
*Національний університет «Львівська політехніка»*

## **ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ МІСЬКОЇ ЕКО-ІНФРАСТРУКТУРИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕТЕРОГЕННИХ МОДЕЛЕЙ ТА AR-ВІЗУАЛІЗАЦІЇ**

**Abstract.** The paper investigates the problem of inefficient urban environmental planning under constrained budgets and high anthropogenic pressure. An intelligent decision support system is proposed, based on a modified Maximal Covering Location Problem (MCLP) model for heterogeneous objects: natural plantations and biotechnical smart modules. The scientific novelty lies in the introduction of urgency coefficients, ensuring priority air purification in critical zones (hospitals, schools). As a direction for further practical implementation, the use of augmented reality (AR) technologies for interaction with the city's digital twin is substantiated.

**Keywords:** decision support system, spatial optimization, augmented reality, environmental safety, urban eco-infrastructure.

**Анотація.** У роботі досліджено проблему неефективного екологічного планування міст в умовах обмежених бюджетів та високого техногенного навантаження. Запропоновано інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень, що базується на модифікованій моделі максимального покриття (MCLP) для гетерогенних об'єктів: природних насаджень та біотехнологічних смарт-модулів. Наукова новизна полягає у впровадженні коефіцієнтів ургентності, що дозволяє забезпечувати пріоритетне очищення повітря у критичних зонах (лікарні, школи). Як напрямок подальшої практичної реалізації системи обґрунтовано доцільність використання технологій доповненої реальності (AR) у середовищі цифрового двійника міста.

**Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень, просторова оптимізація, доповнена реальність, екологічна безпека, міська еко-інфраструктура.

## **Вступ**

Сучасний етап урбанізації супроводжується стрімким зростанням техногенного навантаження на навколишнє середовище, що призводить до системного погіршення якості атмосферного повітря у великих містах [1]. В Україні ця проблема має особливу специфіку через поєднання щільної забудови, високого рівня автомобілізації та постійного техногенного впливу військових дій на екосистеми, що фіксується в режимі реального часу державними моніторинговими сервісами [2]. Це вимагає впровадження інтелектуальних підходів до відбудови міського простору, де пріоритет надається зонам із критичним рівнем забруднення. Підвищена концентрація вихлопних газів та дрібнодисперсного пилу створює пряму загрозу для здоров'я населення, набуваючи особливої гостроти у локаціях підвищеної соціальної вразливості: поблизу медичних установ, шкіл та дитячих майданчиків.

Традиційні підходи до міського озеленення, які переважно спираються на висадку дерев, мають суттєвий недолік - відкладений у часі екологічний ефект. Природним насадженням потрібні роки для досягнення своєї максимальної ефективності. Натомість сучасні біотехнологічні смарт-модулі здатні забезпечити миттєве локальне очищення повітря. Однак їхня висока вартість унеможливорює повсюдне використання. У зв'язку з цим виникає складна оптимізаційна проблема: як знайти ідеальний баланс між цими двома типами гетерогенних об'єктів в умовах суворих обмежень муніципальних бюджетів.

Водночас прийняття рішень щодо розміщення нових об'єктів еко-інфраструктури ускладнюється браком наочних інструментів просторового планування. Традиційні 2D-карти не дають повного уявлення про те, як габаритні смарт-модулі впишуться в щільну міську забудову. Використання технологій розширеної та доповненої реальності (XR/AR) дозволяє подолати цей бар'єр, забезпечуючи імерсивну візуалізацію екологічних даних та інфраструктурних рішень безпосередньо у фізичному просторі міста.

З огляду на актуальність проблеми, метою даного дослідження є розробка концепції інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для оптимізації просторового розміщення міської еко-інфраструктури. У роботі запропоновано модифікацію математичної моделі максимального покриття (MCLP) із впровадженням коефіцієнтів ургентності, а також обґрунтовано перспективність використання технологій доповненої реальності (AR) та концепції цифрового двійника міста для майбутньої візуалізації результатів оптимізації.

## **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Фундаментальною основою для розв'язання задач просторового розміщення є дискретна модель максимального покриття (Maximal Covering Location Problem, MCLP) [3]. Сьогодні алгоритми MCLP активно адаптують для екологічних потреб. Зокрема, М. Neema та А. Ohgai [4] застосували цю модель для оптимізації розміщення зелених дахів. Однак такий підхід спирається виключно на природне озеленення, якому потрібні роки для ефективного очищення повітря.

Концепція Smart City у США та ЄС базується на застосуванні ІКТ та технологій IoT для оптимізації інфраструктури та забезпечення сталого розвитку. Згідно з дослідженням А. Caragliu та ін. [5], міста розглядаються як інтелектуальні системи, що інтегрують цифрові дані для підвищення якості життя та покращення екологічних показників. Проте більшість сучасних рішень все ще зосереджені на пасивному моніторингу міського середовища, що підкреслює потребу в розробці алгоритмів для активного управління міськими та екологічними процесами.

Аналогічна ситуація з інформаційними технологіями спостерігається і в Україні. Успішні платформи еко-моніторингу (SaveEcoBot [6], EcoCity [7], «ЛУН Місто Air» [8]) забезпечують високоякісний збір даних, проте не мають функціоналу для автоматизованої ліквідації забруднень. В умовах масштабної повоєнної відбудови міст критично необхідний перехід від спостереження до дієвих заходів.

Прикладом інноваційних рішень для таких заходів є смарт-модулі CityTree (Green City Solutions), що поєднують живі мохові культури та IoT для інтенсивного поглинання пилу [9]. Однак аналіз муніципальних звітів показує, що на практиці розміщення таких високовартісних

об'єктів часто здійснюється евристично або адміністративно, без застосування математичного апарату просторової оптимізації.

Таким чином, критичний аналіз дозволяє виділити суттєву науково-практичну прогалину: існуючі рішення не розглядають одночасну гетерогенність засобів екологічного захисту (поєднання дерев та смарт-модулів) і не враховують фактор «ургентності» – критичної потреби у швидкому очищенні повітря для специфічних локацій в умовах обмеженого бюджету.

### **Математична модель розміщення об'єктів еко-інфраструктури з урахуванням ургентності**

Для розв'язання задачі раціонального планування міського простору пропонується модифікація класичної моделі максимального покриття (MCLP). Особливістю запропонованого підходу є врахування різноманітності (гетерогенності) засобів очищення повітря та введення динамічного показника терміновості екологічного втручання.

Нехай місто представлено множиною точок попиту  $I = \{1, \dots, n\}$  та множиною потенційних локацій розміщення об'єктів  $J = \{1, \dots, m\}$ . Відстань  $d_{ij}$  між точкою попиту  $i$  та локацією  $j$  розраховується за евклідовою метрикою:

$$d_{ij} = \sqrt{[(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]},$$

де  $d_{ij}$  – відстань між  $i$ -ю точкою попиту та  $j$ -ю потенційною локацією;  $x_i, y_i$  – координати  $i$ -ї точки попиту на площині;  $x_j, y_j$  – координати  $j$ -го потенційного місця розміщення об'єкта.

Значення цієї відстані є базою для формування матриць доступності  $a_{ij}^{(1)}$  та  $a_{ij}^{(2)}$  в системі обмежень моделі.

Цільова функція моделі має наступний вигляд:

$$Z = \sum_{i \in I} w_i \cdot y_i \cdot [(1-U) \cdot E_{tree} + U \cdot E_{smart}] \rightarrow \max,$$

де  $Z$  – загальний показник ефективності екологічного покриття;  $I$  – множина точок попиту (локацій концентрації населення);  $w_i$  – ваговий коефіцієнт важливості  $i$ -ї точки;  $y_i$  – булева змінна, що вказує на наявність екологічного захисту в точці  $i$ ;  $U$  – нормований коефіцієнт ургентності зони, що дозволяє гнучко балансувати пріоритетність між типами інфраструктури;  $E_{tree}$  – нормований показник довгострокової екологічної цінності;  $E_{smart}$  – нормований показник інтенсивності миттєвого очищення.

За такої умови, при  $U \rightarrow 1$  система автоматично віддаватиме перевагу швидким технологічним рішенням у найбільш критичних зонах.

Стан покриття кожної точки попиту  $y_i$  визначається відстанню до найближчого встановленого об'єкта інфраструктури та його технічними характеристиками:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \exists j \in J_{placed}: d_{ij} \leq R_k \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases},$$

де  $d_{ij}$  – евклідова відстань між точкою попиту  $i$  та локацією розміщення об'єкта  $j$ ;  $R_k$  – ефективний радіус екологічного впливу об'єкта типу  $k$ .

#### **Система обмежень**

Оптимальний розподіл ресурсів обмежений наступними математичними умовами:

**1. Бюджетний ліміт:** витрати на обидва типи об'єктів не можуть перевищувати наявні кошти:

$$\sum_{j \in J} (c_1 x_{j1} + c_2 x_{j2}) \leq B,$$

де  $J$  – множина потенційних локацій для розміщення об'єктів;  $c_1, c_2$  – вартість встановлення природного насадження та смарт-модуля CityTree відповідно;  $x_{j1}, x_{j2}$  – змінні рішення про встановлення об'єкта 1-го або 2-го типу в точці  $j$ ;  $B$  – загальний обсяг виділеного фінансування.

**2. Забезпечення покриття:** точка  $i$  вважається покритою ( $y_i = 1$ ) лише тоді, коли в її радіусі дії встановлено принаймні один об'єкт:

$$\sum_{j \in J} a_{ij}^{(1)} x_{j1} + a_{ij}^{(2)} x_{j2} \geq y_i, \quad \forall i \in I,$$

де  $a_{ij}^{(1)}, a_{ij}^{(2)}$  – елементи матриць покриття для відповідних типів об'єктів

**3. Локаційна виключність:** в одній точці не може бути розміщено одночасно два різні типи інфраструктури:

$$x_{j1} + x_{j2} \leq 1, \quad \forall j \in J,$$

де  $x_{j1}, x_{j2}$  – змінні, що визначають тип об'єкта, причому їх сума не може перевищувати 1, що виключає дублювання різних типів інфраструктури в одній локації.

**4. Просторова диференціація (Топологічна сумісність):** розміщення об'єктів природної інфраструктури (дерев,  $k=1$ ) дозволено виключно у підмножині спеціально відведених зон із відкритим ґрунтом ( $J_{tree} \subset J$ ). Натомість технологічні смарт-модулі ( $k=2$ ) можуть бути розміщені у будь-якій точці базової топологічної множини ( $J_{smart} = J$ ). Математично це виражається як заборона встановлення дерев поза межами зелених зон:

$$x_{j1} = 0, \quad \forall j \notin J_{tree}$$

Для практичного впровадження розробленої математичної моделі доцільним є створення системи підтримки прийняття рішень, де алгоритм MCLP виступатиме аналітичним ядром (Model) в архітектурі MVC. На етапі візуалізації (View) результати просторової оптимізації проєктуються на реальне міське середовище за допомогою технологій доповненої реальності (AR). Замість аналізу сухих координат ( $x_i, y_i$ ), експерти та стейкхолдери отримують змогу через імерсивний AR-інтерфейс цифрового двійника міста бачити розрахункові зони покриття  $R_k$  у форматі теплових карт. Крім того, AR-візуалізація дозволяє наочно оцінити просторову сумісність і масштаб біотехнологічних модулів (наприклад, CityTree) із існуючою забудовою та пішохідними потоками [10, 11]. Такий підхід трансформує абстрактні математичні результати оптимізації в інтуїтивно зрозумілий інструмент для муніципального управління.

## Висновки

Запропоновано модифіковану математичну модель MCLP, яка розширює класичний підхід шляхом врахування гетерогенності засобів еко-захисту (природних насаджень та смарт-модулів). Введення коефіцієнта ургентності ( $U$ ) дозволяє математично формалізувати пріоритетність очищення критичних зон міської інфраструктури. Розроблена система обмежень забезпечує раціональний розподіл обмежених бюджетних коштів з урахуванням просторової диференціації об'єктів. Перспективи подальших досліджень полягають у програмній реалізації даної моделі та розробці імерсивного AR-інтерфейсу, що дозволить тестувати сценарії розміщення еко-інфраструктури безпосередньо у середовищі міського цифрового двійника.

1. Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 45(5), 817–820. <https://doi.org/10.1177/2399808318796444>
2. Caragliu, A., Del Bo, C., & Nijkamp, P. (2011). Smart cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, 18(2), 65–82. <https://doi.org/10.1080/10630732.2011.601117>
3. Church, R., & ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 32(1), 101–118. <https://doi.org/10.1007/BF01942293>
4. Green City Solutions. (2026). *CityTree: The world's first biotech pollution filter for urban environments*. <https://greencitysolutions.de/>
5. Hagler, G. S. W., Watkins, T. H., Wright, R. S., Harris, D. B., & Williams, R. W. (2014). Next-generation air quality monitoring—Philadelphia case study. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8945–8946. <https://doi.org/10.1021/es503095x>
6. Portman, M. E., Natapov, A., & Fisher-Gewirtzman, D. (2015). To go where no man has gone before: Virtual reality in architecture, landscape architecture and environmental planning. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.05.001>
7. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization. <https://www.who.int>
8. EcoCity. (2026). *Мережа громадського моніторингу якості повітря*. <https://eco-city.org.ua/>

9. SaveEcoBot. (2026). *Автоматизована система моніторингу якості повітря в Україні*. <https://www.saveecobot.com/>
10. ЛУН Місто Air. (2026). *Дослідження якості міського середовища*. <https://misto.lun.ua/air>
11. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2026). *ЕкоЗагроза: Офіційний ресурс для моніторингу екологічних злочинів та стану довкілля в реальному часі*. <https://ecozagroza.gov.ua/>

**Теницька Ірина, Самусевич Ярина**  
**Сумський державний університет**

## **МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ: ВІД НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО АНАЛІЗУ ДО КОГНІТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ**

Глобальна екологічна криза та перехід до моделі циркулярної економіки ставлять перед промисловим сектором виклики, які неможливо вирішити в межах класичної парадигми менеджменту. Сучасне підприємство генерує колосальні обсяги даних, проте більшість із них залишається несистематизованими. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні багаторівневого механізму, де штучний інтелект (далі - ШІ) виступає як інструмент глибокого аналізу, а інноваційні методи візуалізації, у свою чергу, як інтерфейс для прийняття стратегічних рішень [1]. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від фрагментарного контролю до цілісного інтелектуального супроводу екологічної діяльності.

У ході аналізу наукової літератури закордонних вчених було визначено, що існує потреба у побудові архітектури механізму інтелектуального збору даних [2, 3]. Відтак, першим етапом такої трансформації є створення якісної бази інформації. Головна проблема існуючих систем моніторингу це - низька точність даних через людський фактор або технічні збої обладнання. Вирішенням є впровадження «розумного фільтра» на основі ШІ, що дозволяє [4]:

- автоматично виявляти аномалії: система в режимі реального часу відрізняє звичайні збої датчиків від реальних екологічних інцидентів;
- об'єднувати різні джерела інформації: ШІ здатний одночасно обробляти як цифрові показники приладів, так і візуальні дані (наприклад, знімки з дронів).

Вважаємо, що такий підхід забезпечує високу валідність даних, що є критично важливим для подальшого екологічного аудиту та формування міжнародної звітності.

Іншим важливим етапом трансформації є глибокий аналіз та деталізація екологічних показників. Таким чином, це дасть змогу змінити вектор аналізу: від простого моніторингу до виявлення прихованих причинно-наслідкових зв'язків екологічних показників діяльності підприємств на екологію та сталий розвиток загалом. Саме завдяки ШІ можливо здійснити аналітичний розбір всіх показників, перетворивши масиви даних на управлінські рішення.

Додатковим механізмом моделювання динаміки екологічного впливу застосування нейромереж типу LSTM (які враховують фактор часу). Використання нейромережі LSTM у екологічному контексті дозволить:

- прогнозувати наслідки: оцінювати, як поточні викиди вплинуть на стан довкілля через певний період;
- оптимізувати ресурси: виявляти етапи виробництва з надмірними витратами енергії та пропонувати сценарії зменшення вуглецевого сліду без втрати продуктивності;

- автоматизувати ESG-рейтингування: система самостійно готує звіти, що відповідають вимогам сталого розвитку, значно знижуючи навантаження на екологів та економістів.

Одним із основних результатів та логічним завершенням роботи з ІІІ є інтерпретація результатів. Саме на цьому етапі необхідно поєднати раніше отримані результати з технологіями просторової візуалізації. Відповідно, є можливість побудови глибокої та повної когнітивної моделі підприємства, що у свою чергу дасть змогу детально відобразити масштаб екологічного впливу підприємства на навколишнє природне середовище. Адже, саме коли результати аналізу ІІІ інтегруються у віртуалізований простір об'єкта, екологічна діяльність стає наочною [5]. Це дозволяє симулювати сценарії модернізації: наприклад, віртуально інтегрувати нову систему фільтрації та миттєво побачити, як зміняться показники забруднення в атмосфері навколо заводу. Вважаємо, що така взаємодія людини з даними дозволяє уникнути помилок інтерпретації та робить екологічні ризики фізично відчутними, що стимулює більш відповідальний підхід до інвестицій у зелені технології.

Більше того, даний механізм можна постійно вдосконалювати та доопрацьовувати, наприклад, під впливом нових даних. Для підприємства це означає:

- синхронізацію з вимогами екологічного законодавства: система автоматично оновлює алгоритми аналізу при зміні екологічних нормативів;
- превентивне реагування: можливість запобігти штрафним санкціям шляхом автоматичного коригування роботи обладнання при наблизненні показників до гранично допустимих значень;
- підвищення соціальної відповідальності: наочна демонстрація успіхів у сфері сталого розвитку підвищує довіру з боку зацікавлених сторін.

Таким чином, впровадження інтелектуальних механізмів у систему екологічного менеджменту дозволяє не лише підвищити якість моніторингу, а й забезпечити стратегічну перевагу підприємства. Використання ІІІ для аналізу та прогнозування створює надійну базу для сталого розвитку, перетворюючи екологічні вимоги з «витратної частини» на інструмент оптимізації бізнес-процесів та підвищення інвестиційної привабливості.

1. Hitachi Digital Services (2025). Artificial Intelligence in ESG Reporting: Transforming Compliance into Strategic Sustainability. *Technical White Paper*. [Практичні кейси використання ІІІ для реального моніторингу ESG-показників].

2. Boloş, M., Rusu, Ş., & Sabău-Popa, C. (2024). AI Chatbots: Fast Tracking Sustainability Report Analysis for Enhanced Decision Making. *Amfiteatru Economic*, 26(18), 1241–1255. [Освітлення ролі ІІІ в автоматизації аналізу звітності сталого розвитку].

3. Kaur, M., & Singh, A. (2025). From Industry 4.0 to 5.0: Leveraging AI and IoT for sustainable and human-centric operations. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management*. [Аналіз переходу до Industry 5.0 з акцентом на екологічну стійкість].

4. MDPI Sustainability (2026). Artificial Intelligence and Sustainability in Industry 4.0 and 5.0: Trends and Evolution of the Research Focus. *Sustainability Journal*. [Систематичний огляд використання ІІІ для досягнення цілей сталого розвитку (SDGs)].

5. Куліков Д. Ю., Самофалова М. О. (2024). Вплив штучного інтелекту на розвиток підприємств. *Вісник Університету «Україна»*. [Український контекст впровадження ІІІ-рішень в управлінську діяльність].

## АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МОНІТОРИНГУ ГЛОБАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ CO<sub>2</sub> ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ З ЯДРОМ ПАМ'ЯТІ

Зростання концентрації атмосферного CO<sub>2</sub> є одним із визначальних індикаторів зміни глобального вуглецевого циклу. Для глобальних екологічних задач важливо не лише встановити факт зростання концентрації, а й математично описати структуру часового ряду: довготривалий тренд, сезонні коливання, міжрічні аномалії та інерційну реакцію природних поглиначів. Неперервна серія вимірювань CO<sub>2</sub>, яка вважається глобальним світовим стандартом, отримана за допомогою реєструючого недисперсійного інфрачервоного газоаналізатора у міжнародній науковій лабораторії спостережень Mauna Loa на острові Гаваї. Дві основні причини мінливості даних - це сезонне коливання та довгострокове збільшення внаслідок людської діяльності. Сезонне коливання відображає комплексне поглинання та вивільнення CO<sub>2</sub> наземними рослинами та ґрунтом [1].

Класичний ряд Mauna Loa став основою для виявлення антропогенного тренду CO<sub>2</sub>. У роботі С. D. Keeling та співавторів було показано, що довготривалі прямі вимірювання дають можливість розділити сезонну мінливість і повільне накопичення CO<sub>2</sub> в атмосфері [1]. Подальший розвиток методики NOAA (Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США) пов'язаний з апроксимацією тренду поліномами, поданням сезонного циклу гармоніками та фільтрацією залишків у частотній області [2, 3]. Проте сучасні дані останніх років демонструють не тільки плавне зростання, а й посилення міжрічної мінливості, пов'язаної з відомим явищем Ель-Ніньйо, пожежами, посухами та зміною ефективності наземних і океанічних поглиначів [4-7].

Проблема полягає в тому, що прості трендові моделі добре описують загальне зростання, але не дають окремого кількісного показника інерційності ряду. Балансові та інверсійні моделі є фізично змістовними, але потребують великої кількості зовнішніх даних: викидів, потоків океану, стану біосфери, метеорологічних полів і моделей перенесення.

Перший поширений підхід – емпірична декомпозиція ряду на трендову, сезонну та залишкову складові. У загальному вигляді концентрацію подають як

$$C(t)=T(t)+S(t)+\varepsilon(t). \quad (1)$$

У методиці NOAA довготривале зростання  $T(t)$  зазвичай апроксимується поліноміальною функцією, а сезонна складова  $S(t)$  – гармоніками річного циклу [3]. Перевагою такого підходу є простота, прозорість та придатність до автоматичної обробки довгих рядів. Недолік полягає в тому, що залишкова міжрічна мінливість часто розглядається як шум або як окрема статистична поправка, а не як динамічна складова з власною інерцією.

Другий підхід – глобальний баланс вуглецю. У працях Global Carbon Budget концентрація CO<sub>2</sub> розглядається через перерозподіл антропогенних викидів між атмосферою, океаном і суходолом [4, 5]. Типовий баланс можна записати так:

$$EFOS(t)+ELUC(t)=GATM(t)+SOCEAN(t)+SLAND(t)+BIM(t). \quad (2)$$

де  $EFOS$  - викиди від викопного палива,  $ELUC$  - викиди від змін землекористування,  $GATM$  - приріст вуглецю в атмосфері,  $SOCEAN$  і  $SLAND$  - океанічний та наземний поглиначі,  $BIM$  - нев'язка балансу. Цей підхід є фізично найзмістовнішим, однак він потребує складної системи даних і моделей.

Третій підхід – атмосферні інверсії та системи асиміляції даних. Наприклад, CarbonTracker поєднує спостереження CO<sub>2</sub> з моделями атмосферного перенесення для оцінки поверхневих потоків CO<sub>2</sub> [8]. Математично це подано операторним рівнянням

$$Cobs(t,x)=\mathcal{T}[Fsurface(t,x)]+\eta, \quad (3)$$

де  $Cobs(t,x)$  – спостережна концентрація  $CO_2$  у певний момент часу  $t$  в певній точці простору  $x$ ,  $\mathcal{T}$  – оператор перенесення,  $Fsurface$  – поверхневі потоки джерел і поглиначів, а поверхневий потік  $CO_2$  це його надходження або поглинання поверхнею Землі в момент часу  $t$  в точці  $x$  (це можуть бути викиди від промисловості, транспорту, пожеж, дихання ґрунтів, а також поглинання рослинністю й океаном),  $\eta$  – похибка вимірювання та моделювання. Отже зміст рівняння такий – спостережна концентрація  $CO_2$  у певній точці атмосфери дорівнює результату перенесення і змішування поверхневих потоків  $CO_2$  атмосферою плюс похибка моделі. Такий клас моделей дає просторово розподілену інформацію, проте не є простим інструментом для швидкого аналізу одного часового ряду. Сучасні роботи з низькою затримкою даних поєднують інверсії, динамічні моделі рослинності та емулятори океанічного поглинача, що дало змогу пояснювати аномалії 2023–2024 років [6; 7].

Четвертий підхід – імпульсні функції відгуку вуглецевого циклу. Вони використовуються для оцінки того, яка частка імпульсного викиду  $CO_2$  залишається в атмосфері через певний час [9]. Узагальнено це має вигляд згортки:

$$C(t)=C_0+\beta\int_0^tE(\tau)R(t-\tau)d\tau \quad (4)$$

яка описує концентрацію  $CO_2$  як результат згортки історії антропогенних викидів із функцією відгуку вуглецевої системи, де  $\beta$  - коефіцієнт перерахунку викидів у зміну концентрації  $CO_2$ ,  $C(t)$  - концентрація  $CO_2$  в атмосфері у момент часу  $t$ , наприклад у ppm,  $C_0$  - початкова або фоновая концентрація  $CO_2$  у початковий момент  $t=0$ ,  $E(\tau)$ - антропогенні викиди  $CO_2$  у попередній момент часу  $\tau$ . Наприклад, це можуть бути глобальні річні викиди  $CO_2$  від викопного палива та землекористування,  $\tau$  - змінна інтегрування, тобто “минулий час”. Інтеграл підсумовує всі попередні моменти від початку розрахунку 0 до поточного часу  $t$ ,  $t-\tau$  - час, що минув після викиду,  $R(t-\tau)$  - функція відгуку, або ядро пам’яті атмосфери - океану - біосфери. Вона показує, яка частка викиду, зробленого у момент  $\tau$ , залишається в атмосфері через час  $t-\tau$ .

Цей клас моделей уже містить ідею пам’яті, але пам’ять тут пов’язана з реакцією атмосфери на викиди. Тому доцільно розглянути проміжний підхід: модель, яка працює безпосередньо з часовим рядом  $CO_2$ , але вводить додаткову інтегральну складову пам’яті, що враховує попередні темпи приросту. У запропонованій постановці пам’ять введена інакше: як зважений внесок попередніх темпів приросту самого спостережного ряду  $CO_2$  для прикладу за останні 10 років. Тому запропонована модель не дублює імпульсну функцію відгуку, а є короткоперіодною емпірично-динамічною моделлю часової інерції. Узагальнене порівняння типових підходів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння підходів до математичного опису глобального  $CO_2$

| Підхід             | Типові дані                   | Математична модель                | Обмеження                                  |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| Тренд + сезонність | Ряд $CO_2$                    | Поліном + гармоніки               | Слабкий опис міжрічної інерції             |
| Глобальний бюджет  | Викиди, океан, суходіл        | Баланс потоків                    | Потребує багатьох зовнішніх даних          |
| Інверсії           | Станції, супутники, транспорт | Оцінка потоків за спостереженнями | Складність і велика обчислювальна вартість |
| Імпульсний відгук  | Сценарії викидів              | Згортка з $R(t)$                  | Орієнтований на викиди                     |
| Ядро пам’яті       | Тільки часовий ряд $CO_2$     | Згортка попередніх приростів      | Потребує перевірки фізичної інтерпретації  |

Основний запис запропонованої моделі має вигляд:

$$C(t)=T(t)+S(t)+M(t) \quad (5)$$

Трендова складова береться у вигляді полінома відносно часу  $x=t-t_0$  ( $x$  – це відносний час, тобто час, відрахований від початку аналізованого інтервалу):

$$T(t)=a_0+a_1x+a_2x^2 \quad (6)$$

Сезонна складова задається першою та другою гармоніками річного циклу з відповідними коефіцієнтами:

$$S(t)=b_1\sin(2\pi t)+c_1\cos(2\pi t)+b_2\sin(4\pi t)+c_2\cos(4\pi t) \quad (7)$$

Пам'яттєва складова  $M(t)$  вводиться як згортка попередніх відхилень темпу приросту  $g(t)$  від середнього значення за період, а проміжок інтегрування – це часовий проміжок досліджень:

$$M(t)=\lambda \int_0^{10} K(s,\tau)[g(t-s)-\bar{g}]ds \quad (8)$$

$\lambda$  - коефіцієнт інтенсивності пам'яті,  $s$  - час запізнення, або “вік” попереднього впливу,  $\tau$  - характерний час пам'яті, який визначає, для якого запізнення внесок минулого є найбільшим (для ядра максимум досягається при  $s=\tau$ ),  $\bar{g}$  - середнє значення швидкості приросту  $\text{CO}_2$  за аналізований період,  $K(s,\tau)$  - ядро пам'яті - вагова функція, яка визначає, наскільки сильно попередні зміни  $\text{CO}_2$  з різним запізненням  $s$  впливають на поточний стан, вираз  $g(t-s)-\bar{g}$  показує, чи був попередній темп приросту  $\text{CO}_2$  більшим або меншим за середній.

Чисельні розрахунки за програмною блок-схемою (рис.1) на інтервалі останнього десятиріччя показали добре співпадіння (не більше 5% похибки) розрахункових результатів концентрації  $\text{CO}_2$  з даними глобальних спостережень Мауна-Лоа.

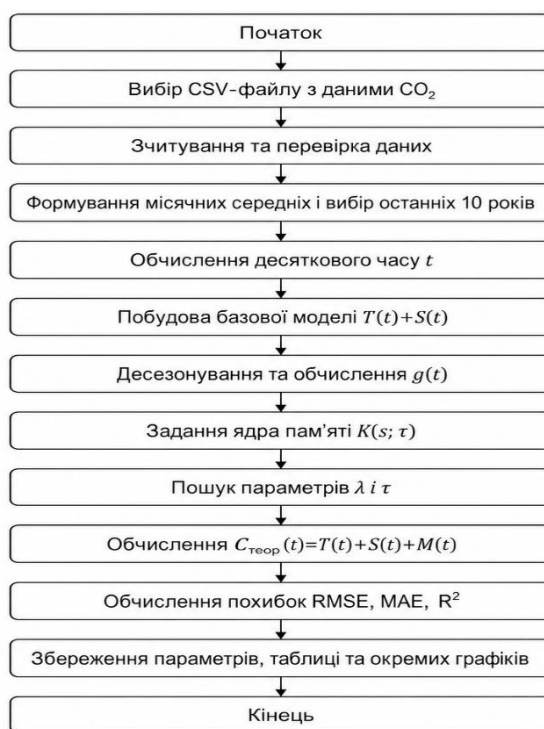


Рис. 1. Блок – схема програмних чисельних розрахунків.

Поряд з тим, для глобальних даних CO<sub>2</sub> ефективно використовуються кілька класичних сучасних моделей: емпірична декомпозиція тренду й сезонності, глобальні баланси вуглецю, атмосферні інверсії, супутникові реконструкції та імпульсні функції відгуку. За останні п'ять років особливу увагу привертають роботи, які аналізують аномалії 2023–2024 років і пов'язують підвищений темп росту CO<sub>2</sub> з ослабленням наземного поглинача, відомим явищем Ель-Ніньйо та екстремальними кліматичними подіями [4 - 7; 10; 11]. Порівняно з імпульсними функціями відгуку вуглецевого циклу запропоноване ядро пам'яті має коротший часовий горизонт і прив'язане до локальної структури спостережного ряду. У класичних моделях пам'ять описує реакцію системи на одиничний викид, у запропонованій моделі пам'ять описує внесок попередніх темпів зміни самого ряду CO<sub>2</sub>. Це робить її зручною для аналізу, наприклад, останнього десятиріччя, де особливо помітні зміни темпів росту.

Запропонована модель з ядром пам'яті є доцільним проміжним підходом між простою трендовою апроксимацією та складними фізичними моделями. Її новизна полягає у введенні скінченного інтегрального ядра  $K(s;\tau)$  (гамма-ядра другого порядку), яке дозволяє врахувати вплив попередніх темпів приросту CO<sub>2</sub> на поточну концентрацію.

1. Keeling C. D., Bacastow R. B., Bainbridge A. E., Ekdahl C. A., Guenther P. R., Waterman L. S. Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Tellus*. 1976. Vol. 28, No. 6. P. 538–551. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1976.tb00701.x.

2. Thoning K. W., Tans P. P., Komhyr W. D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974–1985. *Journal of Geophysical Research*. 1989. Vol. 94, No. D6. P. 8549–8565. DOI: 10.1029/JD094iD06p08549.

3. Curve Fitting Methods Applied to Time Series in NOAA GML. NOAA Global Monitoring Laboratory. URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/mb/mbfit/mbfit.html>

4. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W., Andrew R. M., Hauck J., Landschützer P., Le Quéré C. et al. Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*. 2025. Vol. 17. P. 965–1039. DOI: 10.5194/essd-17-965-2025.

5. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M. W., Andrew R. M., Hauck J., Landschützer P., Le Quéré C. et al. Global Carbon Budget 2025. *Earth System Science Data Discussions*. 2025. URL: <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2025-659/>

6. Ke P., Ciais P., Sitch S., Li W., Bastos A., Liu Z., Xu Y. et al. Low latency carbon budget analysis reveals a large decline of the land carbon sink in 2023. *National Science Review*. 2024. Vol. 11, No. 12. Article nwae367. DOI: 10.1093/nsr/nwae367.

7. Ciais P., Ke P., Yao Y., Sitch S., Li W., Xu Y., Du X. et al. Low latency global carbon budget indicates reduced land carbon sink in the year 2024. *National Science Review*. 2026. Vol. 13, No. 2. Article nwaf594. DOI: 10.1093/nsr/nwaf594.

8. CarbonTracker CT2022. NOAA Global Monitoring Laboratory. URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/carbontracker/>.

9. Joos F., Roth R., Fuglestad J. S., Peters G. P., Enting I. G., von Bloh W., Brovkin V. et al. Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013. Vol. 13. P. 2793–2825. DOI: 10.5194/acp-13-2793-2013.

10. Canadell J. G., Monteiro P. M. S., Costa M. H., Cotrim da Cunha L., Cox P. M., Eliseev A. V., Henson S. et al. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-5/>.

11. Hu K., Zhang X., Wang L., Li X. A Review of Satellite-Based CO<sub>2</sub> Data Reconstruction. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 20. Article 3818. DOI: 10.3390/rs16203818.

ЕЛЕКТРОННЕ НАУКОВЕ ВИДАННЯ

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

## INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE ENVIRONMENTAL PROTECTION

Матеріали

III Міжнародної науково-практичної конференції  
14-15 травня 2026 р., Україна, м. Львів

Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/iter-2026> вільний

*Відповідальний за випуск: Лагун А. Е.*

Видавець і виготівник: Видавництво Львівської політехніки  
*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4459 від 27.12.2012 р.*

вул. Ф. Колесси, 4, Львів, 79013  
тел. +380 32 2584103, факс +380 32 2584101  
[vlp.com.ua](http://vlp.com.ua), ел. пошта: [vmr@vlp.com.ua](mailto:vmr@vlp.com.ua)